

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Luka Barbača

Zagreb, 2012.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivo Džijan, dipl. ing.

Student:

Luka Barbača

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Ivi Džijanu, što mi je dopustio da u diplomskom radu obrađujem temu koju sam predložio, i na svojoj pomoći i savjetima tijekom izrade istog.

Želio bih se zahvaliti svim profesorima, asistentima i djelatnicima Katedre za mehaniku fluida na pomoći, savjetima i raspravama tijekom mog studija.

Naposljetku, velika zahvala cijeloj zajednici hrvatskih, a posebno jadriskih jedriličara na dasci, na idejama, komentarima, kritikama i podršci tijekom izrade ovog rada.

Luka Barbača



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Barbača** Mat. br.: 0035162884

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj promjene oblika daske za jedrenje na sile otpora i uzgona**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of the windsurfing board shape on the drag and lift forces**

Opis zadatka:

Na maksimalnu brzinu koju jedriličar na dasci može postići najviše utječu oblik daske za jedrenje i karakteristike peraje koja se nalazi pričvršćena za dno daske. Nova geometrija daske se danas većinom testira u praktičnoj upotrebi. S razvojem računalne dinamike fluida otvara se mogućnost analize različitih geometrijskih modela daske za jedrenje numeričkim simuliranjem što skraćuje vrijeme i smanjuje troškove razvoja nove geometrije daske za jedrenje.

U diplomskom radu treba, uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, numerički simulirati gibanje daske za jedrenje bez peraje po mirnoj površini vode za nekoliko različitih oblika daske. Pri tome treba koristiti model stacionarnog trodimenzijskog turbulentnog strujanja nestlačivog fluida sa slobodnom površinom. Na temelju rezultata numeričke simulacije treba odrediti promjenu sile otpora i sile uzgona s promjenom geometrije daske za jedrenje pri čemu kut zakreta, dubina urona i brzina gibanja daske trebaju biti konstantni.

Rad treba sadržavati:

1. Uvod s opisom različitih oblika daske za jedrenje.
2. Matematičku osnovu numeričkih metoda za simulaciju strujanja sa slobodnom površinom.
3. Opis računalnog modela gibanja daske za jedrenje po slobodnoj površini vode.
4. Prikaz i analiza rezultata numeričkih simulacija za različite oblike daske.
5. Zaključke.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.

U radu treba navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:

8. ožujka 2012.

Rok predaje rada:

10. svibnja 2012.

Predviđeni datumi obrane:

16., 17. i 18. svibnja 2012.

Zadatak zadao:

Ivo Džijan
Prof. dr. sc. Ivo Džijan

Predsjednik Povjerenstva:

Mladen Andrassy
Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Sadržaj

Sadržaj	I
Popis slika	III
Popis tablica	VI
Popis oznaka	VII
Sažetak	IX
1 Uvod	1
2 Geometrija daske za jedrenje	3
2.1 Discipline jedrenja na dasci	3
2.2 Geometrijske karakteristike daske za jedrenje	6
3 Matematičke osnove numeričkih metoda za simulaciju strujanja sa slobodnom površinom	10
3.1 Metoda kontrolnih volumena	10
3.1.1 Uzvodna shema prvog reda točnosti	12
3.1.2 Uzvodna shema drugog reda točnosti	12
3.1.3 Linearizirana forma diskretiziranih jednadžbi	12
3.1.4 Podrelaksacija	13
3.1.5 Vremenska diskretizacija	13
3.2 VOF model slobodne površine	15
3.2.1 Jednadžba volumnih udjela	16
3.2.2 Svojstva	16
3.2.3 Jednadžba količine gibanja	16
3.2.4 Energetska jednadžba	17
3.2.5 Dodatne skalarne jednadžbe	17
3.2.6 Interpolacija u blizini granice	17
3.2.7 Vremenska ovisnost	18

4	Opis računalnog modela gibanja daske za jedrenje po slobodnoj površini vode	19
4.1	Izrada geometrijskih modela	19
4.1.1	Bazna geometrija	19
4.1.2	Modeli s promijenjenim uzdužnim oblikom dna	19
4.1.3	Modeli s promijenjenom širinom na krmi	21
4.1.4	Modeli s različitim poprečnim oblikom dna	21
4.1.5	Modeli s različitim oblicima krmenog dijela	22
4.2	Izrada numeričkog modela	24
4.2.1	Definiranje računalne domene i računalne mreže	24
4.2.2	Fizikalni model	27
4.2.3	Rubni uvjeti	27
5	Prikaz i analiza rezultata numeričkih simulacija	29
5.1	Model s baznom geometrijom	30
5.2	Daske s promijenjenim uzdužnim oblikom dna	36
5.3	Daske s promijenjenom širinom na krmi	37
5.4	Daske s poprečnim oblikom dna u obliku ravnog V-a	39
5.5	Daske s poprečnim oblikom dna u obliku dvostruke konkave	40
5.6	Daske s poprečnim oblikom dna u obliku monokonkave	42
5.7	Daske s bočnim isječcima	44
5.8	Daske s bočnim isječcima i bočnim suženjima	46
5.9	Daske s isječcima	48
5.10	Daske s bočnim isječcima, isječcima i bočnim suženjima	53
5.11	Pregled rezultata za sve ispitivane modele	54
6	Zaključak	56
	Prilog	57
	Literatura	58

Popis slika

1	Jedriličar na dasci	1
2	Discipline jedrenja na dasci (<i>wave, freestyle, slalom i speed</i>)	5
3	Oblici dasaka za jedrenje, <i>a)wave, b)freestyle, c)slalom, d)speed i e)formula</i>	5
4	Daska s definicijom nekih geometrijskih parametara	7
5	Uzdužni oblik dna daske za jedrenje	7
6	Poprečni oblici dna daske za jedrenje, a)ravni V, b)dvostruka konkava i c)monokonkava	9
7	Oblici krmenog dijela daske za jedrenje, a)bočni isječci, b)bočna suženja i c)isječci	9
8	Kontrolni volumen korišten za prikaz jednadžbe transporta skalarne veličine	11
9	Stvarna granica i njezina interpolacija shemom geometrijske rekonstrukcije	18
10	Bazna geometrija daske s osnovnim geometrijskim parametrima	20
11	Modeli s različitim uzdužnim oblikom dna	20
12	Modeli s različitom širinom na krmu	21
13	Modeli s različitim poprečnim presjekom dna i načinom definiranja promjena geometrije	22
14	Modeli s bočnim isječcima i bočnim suženjima, s načinom definiranja geometrije	23
15	Model s isječkom s načinom definiranja geometrije	23
16	Računalna domena	24
17	Diskretizacija na rubovima domene	25
18	Područje finije diskretizacije uz dasku i slobodnu površinu	26
19	Diskretizacija na površini daske	26
20	Odabir fizikalnog modela	27
21	Rubni uvjeti	28
22	Karakteristični izgled slobodne površine - izometrija	30
23	Karakteristični izgled slobodne površine - pogled odozgo	32
24	Karakteristični izgled slobodne površine - pogled sprijeda	32

25	Karakteristični izgled slobodne površine - detalj na ravnini simetrije	32
26	Polje brzine na slobodnoj površini - pogled odozgo	33
27	Polje brzine na ravnini simetrije	33
28	Polje brzine na ravnini $x = 0$ m	34
29	Polje brzine na ravnini $x = -1$ m	34
30	Polje tlaka na ravnini simetrije	35
31	Polje tlaka na površini daske - pogled sprijeda	35
32	Polje tlaka na površini daske - pogled straga	35
33	Promjena sile otpora s promjenom uzdužnog oblika dna	36
34	Promjena sile uzgona s promjenom uzdužnog oblika dna	37
35	Promjena sile otpora s promjenom širine na krmi	38
36	Promjena sile uzgona s promjenom širine na krmi	38
37	Promjena sile otpora kod modela s poprečnim oblikom dna oblika ravnog V-a	39
38	Promjena sile uzgona kod modela s poprečnim oblikom dna oblika ravnog V	40
39	Promjena sile otpora kod modela s poprečnim oblikom dna oblika dvostruke konkave	41
40	Promjena sile uzgona kod modela s poprečnim oblikom dna oblika dvos- truke konkave	41
41	Polje brzine na slobodnoj površini - pogled odozgo ($h_{mc} = 7.5$ mm)	42
42	Promjena sile otpora kod modela s poprečnim oblikom dna oblika mono- konkave	43
43	Promjena sile uzgona kod modela s poprečnim oblikom dna oblika mono- konkave	43
44	Polje tlaka na površinama bočnih isječaka ($l_{sc} = 170$ mm, $w_{sc} = 30$ mm) .	44
45	Promjena sile otpora kod modela s bočnim isječcima	45
46	Promjena sile uzgona kod modela s bočnim isječcima	45
47	Polje tlaka na površinama bočnih isječaka i bočnog suženja ($w_w = 140$ mm)	46
48	Promjena sile otpora kod modela s bočnim isječcima i bočnim suženjima .	47
49	Promjena sile uzgona kod modela s bočnim isječcima i bočnim suženjima .	47

50	Polje tlaka na površinama isječaka ($l_{ct} = 200$ mm, $w_{ct} = 30$ mm, $h_{ct} = 15$ mm)	49
51	Volumni udjel vode na površinama isječaka ($l_{ct} = 200$ mm, $w_{ct} = 30$ mm, $h_{ct} = 15$ mm)	49
52	Slobodna površina oko krme modela s isječcima - pogled odozgo ($l_{ct} = 200$ mm, $w_{ct} = 30$ mm, $h_{ct} = 15$ mm)	50
53	Polje na slobodnoj ovršini oko krme modela s isječcima - pogled odozgo ($l_{ct} = 200$ mm, $w_{ct} = 30$ mm, $h_{ct} = 15$ mm)	50
54	Promjena sile otpora s obzirom na veličinu isječka	51
55	Promjena sile uzgona s obzirom na dubinu isječka	51
56	Promjena sile otpora s obzirom na dubinu isječka	52
57	Promjena sile uzgona s obzirom na dubinu isječka	52
58	Promjena sile otpora za modele s bočnim isječcima, isječcima i bočnim suženjima	53
59	Promjena sile uzgona za modele s bočnim isječcima, isječcima i bočnim suženjima	54

Popis tablica

1	Vrijednosti sila za sve ispitivane oblike daske za jedrenje	55
---	---	----

Popis oznaka:

$A, [\text{m}^2] \rightarrow$ površina

$a_p; a_{nb}, [-] \rightarrow$ linearizirani koeficijenti za skalarnu veličinu ϕ

$b, [\text{m}] \rightarrow$ dubina urona daske na krmi

$E, [\text{J}] \rightarrow$ energija

$F, [\text{N}] \rightarrow$ sila

$F_D, [\text{N}] \rightarrow$ ukupna sila otpora

$F_{DP}, [\text{N}] \rightarrow$ sila preostalog otpora

$F_{DV}, [\text{N}] \rightarrow$ sila otpora trenja

$F_L, [\text{N}] \rightarrow$ sila uzgona

$g, [\text{m/s}^2] \rightarrow$ gravitacijsko ubrzanje

$h_{ct}, [\text{m}] \rightarrow$ dubina isječka

$h_{dc}, [\text{m}] \rightarrow$ dubina dvostrukih konkava

$h_{max}, [\text{m}] \rightarrow$ maksimalna visina uzdužne linije dna na pramcu

$h_{mc}, [\text{m}] \rightarrow$ dubina monokonkave

$k, [\text{J}] \rightarrow$ kinetička energija turbulencije

$k_{eff}, [\text{W/m}^2\text{K}] \rightarrow$ efektivna toplinska provodnost

$l, [\text{m}] \rightarrow$ duljina daske za jedrenje

$l_{ct}, [\text{m}] \rightarrow$ duljina isječka

$l_f, [\text{m}] \rightarrow$ duljina ravnog dijela uzdužnog oblika dna, mjerena od krme

$l_{sc}, [\text{m}] \rightarrow$ duljina bočnog isječka

$p, [\text{Pa}] \rightarrow$ tlak

$S_h, [\text{J}] \rightarrow$ izvor energije

$S_{\alpha_q}, [-] \rightarrow$ izvor q -te faze

$S_\phi, [-] \rightarrow$ izvor veličine ϕ po jedinici volumena

$T, [\text{K}] \rightarrow$ temperatura

$t, [\text{m}] \rightarrow$ debljina daske za jedrenje

$V, [\text{m}^3] \rightarrow$ volumen daske za jedrenje; volumen kontrolnog volumena

$v, [\text{m/s}] \rightarrow$ brzina

$w, [\text{m}] \rightarrow$ širina daske za jedrenje

- $w_{ct}, [\text{m}] \longrightarrow$ širina isječka
- $w_{OFO}, [\text{m}] \longrightarrow$ širina daske za jedrenje na udaljenosti 300 mm od krme
- $w_{sc}, [\text{m}] \longrightarrow$ širina bočnog isječka
- $w_w, [\text{m}] \longrightarrow$ širina bočnog suženja
- $\alpha, [-; ^\circ] \longrightarrow$ faktor podrelaksacije; kut nagiba daske
- $\alpha_q, [-] \longrightarrow$ volumni udio q -tog fluida u kontrolnom volumenu
- $\alpha_V, [\text{m}] \longrightarrow$ kut nagiba poprečne linije dna
- $\Gamma_\phi, [\text{m}^2/\text{s}] \longrightarrow$ koeficijent difuzije veličine ϕ
- $\Delta_s, [\text{m}] \longrightarrow$ udaljenost središta i površine kontrolnog volumena
- $\Delta\phi, [-] \longrightarrow$ promjena skalarne veličine
- $\varepsilon, [\text{J}] \longrightarrow$ disipacija kinetičke energije turbulencije
- $\mu, [\text{Pas}] \longrightarrow$ koeficijent dinamičke viskoznosti
- $\rho, [\text{kg}/\text{m}^3] \longrightarrow$ gustoća fluida
- $\phi, [-] \longrightarrow$ skalarne veličine
- $\phi_{old}, [-] \longrightarrow$ stara vrijednost skalarne veličine
- $\nabla, [-] \longrightarrow$ vektorski diferencijalni operator

Sažetak

Tema ovog diplomskog rada je bila izrada numeričke simulacije gibanja daske za jedrenje po površini vode, u pojednostavljenoj trodimenzionalnoj situaciji. Za izradu numeričke simulacije korištena je metoda kontrolnih volumena unutar računalnog programa STAR-CCM+, te VOF (*Volume of fluid*) model za opisivanje slobodne površine. Cilj numeričke simulacije je analiza promjene sila otpora i uzgona koje djeluju na dasku za jedrenje, prilikom promjene oblika daske. Napravljen je razmjerno velik broj simulacija, a oblici daske su bazirani na oblicima dasaka koje su dostupne na tržištu. Rezultati simulacija dani su u obliku slika i dijagrama. Rezultati su izvrsna podloga za daljnja numerička i eksperimentalna istraživanja.

1 Uvod

Jedrenje na dasci (eng. *windsurfing*) postaje sve popularniji oblik rekreacije. Jednom kad čovjek odluči pokušati jedriti na dasci, jedan od najbitnijih faktora je pravilan izbor opreme na kojoj će napraviti svoje prve korake. Razvojem jedriličarskih sposobnosti, čovjek iskušava sve više uvjeta (različite jačine vjetera i veličine valova) i orijentira se prema određenoj disciplini jedrenja na dasci, te prema toj orijentaciji traži opremu koja je prilagođena odabranoj disciplini.

Jedan od osnovnih djelova opreme za jedrenje na dasci je, naravno, sama daska. Za razvoj dasaka proizvođači danas u velikoj većini slučajeva koriste metodu pokušaja i pogreške. Takav način razvoja je skup, jer zahtjeva od proizvođača izradu velikog broja testnih modela, te plaćanje tima vrhunskih jedriličara na dasci koji svojim komentarima usmjeravaju dizajnere prilikom projektiranja novih dasaka.



Slika 1: Jedriličar na dasci

Razvojem numeričkih simulacija, a posebice računalne dinamike fluida, otvara se mogućnost primjene simulacijskih alata prilikom razvoja dasaka za jedrenje. Na ovaj način, smanjio bi se utjecaj subjektivnih procjena jedriličara koji testiraju daske, te bi se dobio objektivniji uvid u razlike performansi pojedinih modela. Dakako, za neke karakteristike daske, kao što su upravljivost u okretu, kontrola na uzburkanom moru i sl., i dalje bi bila potrebna testiranja od strane vrhunskih jedriličara.

U ovom diplomskom radu pokušati će se upotrebom računalne dinamike fluida odrediti veza između pojedinih parametara geometrije daske za jedrenje, i sila otpora i uzgona koje djeluju na dasku. Simulacije će biti provedene za trodimenzionalnu situaciju, a površina mora će biti ravna (bez valova). Za provođenje simulacija biti će korišten računalni program STAR-CCM+ i VOF (*Volume of Fluid*) modela za opisivanje slobodne površine.

2 Geometrija daske za jedrenje

Najvažniji utjecaj na karakteristike daske za jedrenje ima njezin oblik. Neke od najbitnijih karakteristika daske su: maksimalna brzina po pravcu, omogućavanje ranog glisiranja (na što slabijem vjetru), ubrzanje, upravljivost u okretu, upravljivost na uzburkanom moru, mogućnost korištenja sa širokim spektrom veličina jedra, itd. Promjenama geometrijskih parametara postiže se kombinacija karakteristika koja odgovara pojedinoj disciplini jedrenja na dasci. U jedrenju na dasci postoji nekoliko disciplina kojima se pojedinac može baviti, a za svaku od njih postoji posebno prilagođena oprema. Oblici dasaka za jedrenje prilagođenih za pojedine discipline prikazani su na slici 3.

2.1 Discipline jedrenja na dasci

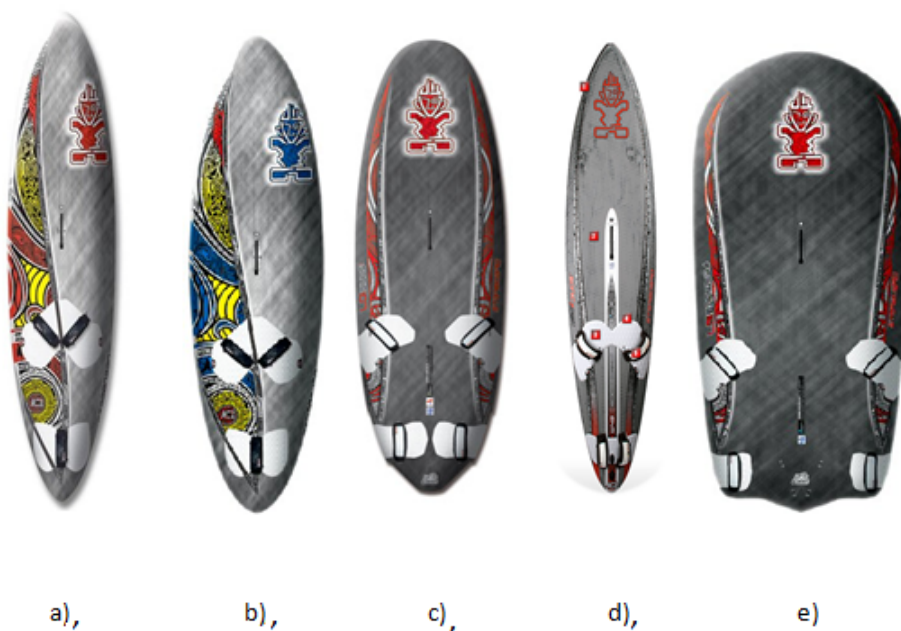
- **Izvedba na valovima (eng. *wave*)** - kod natjecanja u izvedbi na valovima suci ocjenjuju dojam koji natjecatelji ostave izvedbama skokova i elegancijom spuštanja niz velike valove. Ova disciplina je najslićnija običnom surfanju, a može se prakticirati samo na iznimno jakom vjetru, ili na mjestima gdje se lome veliki oceanski valovi. Daske koje se koriste moraju biti iznimno čvrste, kako bi podnijele naprezanja prilikom doskoka s velikih visina, moraju imati dobru upravljivost na uzburkanom moru i niz valove, te uzak radijus okretanja.
- **Izvedba slobodnim stilom (eng. *freestyle*)** - izvedba slobodnim stilom uključuje izvođenje raznih trikova na malo uzburkanom moru, ili na moru bez valova. Natjecatelji izvode razne skokove, okrete i klizjuće trikove, a suci ocjenjuju ukupni dojam. Daske za ovu disciplinu moraju imati izvrsnu upravljivost, te moraju lako klizati po površini vode bokom i krmom. Također, pošto se natjecanja obično odvijaju na slabijem vjetru, moraju omogućavati lako glisiranje
- **Slalom** - slalom je disciplina gdje se natjecatelji utrkuju po označenom polju. Natjecatelji mogu obilaziti polje na način da putanjom opisuju oblik broja osam ili na način da sa svakim okretom idu sve više niz vjetar. Ova disciplina se prakticira po jakom i slabom vjetru. Daske za jaki vjetar moraju imati visoku maksimalnu br-

zinu po pravcu, dobro ubrzanje i kontrolu po relativno uzburkanom moru. Daske za slabi vjetar moraju omogućavati lagano glisiranje i održavanje brzine u područjima sa slabim vjetrom.

- **Formula** - kod natjecanja u ovoj disciplini natjecatelji se utrkuju između dvije oznake, od kojih je jedna postavljena ravno u vjetar, a druga ravno niz vjetar. Natjecatelji sami biraju putanju kojom će obići oznake. Ova disciplina je najbližnja standardnom jedrenju u različitim klasama jedrilica. Za ovu disciplinu je potrebno najmanje vjetra, stoga su daske najveće i omogućavaju vrlo lagano glisiranje, također, omogućavaju jedrenje oštro uz vjetar i široko niz vjetar.
- **Brzinsko jedrenje (eng. *speedsurfing*)** - u brzinskom jedrenju natjecatelj pokušava postići maksimalnu prosječnu brzinu na određenoj udaljenosti, ili u određenom vremenskom razmaku. Ova disciplina se prakticira na mjestima gdje pušu jaki vjetrovi, ali zbog konfiguracije obale ili male dubine, površina mora ostaje ravna. Daske za brzinsko jedrenje su visoko specijalizirane i projektirane bez kompromisa, s jednim ciljem, a to je postizanje maksimalne brzine.
- **Slobodna vožnja (eng. *freeride*)** - ovo je nenatjecateljski oblik jedrenja na dasci, kojim se bave većinom rekreativci. Uključuje sve; brzu vožnju po pravcu, okrete, pa i pokoji trik. Geometrija daske je dobivena kao kompromis, tako da zadovolji široki spektar upotrebe.



Slika 2: Discipline jedrenja na dasci (*wave, freestyle, slalom i speed*)



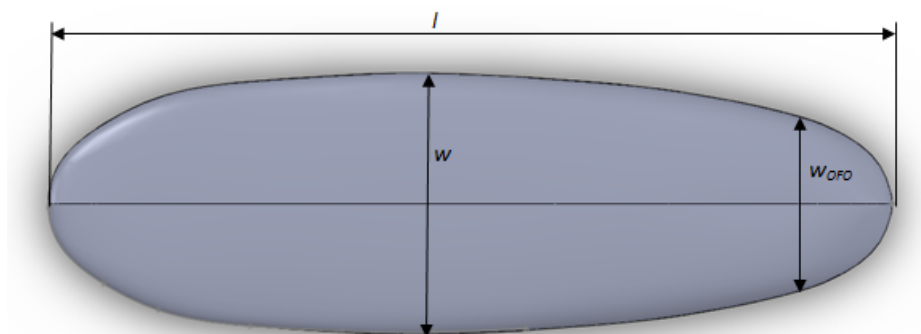
Slika 3: Oblici dasaka za jedrenje, a) *wave*, b) *freestyle*, c) *slalom*, d) *speed* i e) *formula*

2.2 Geometrijske karakteristike daske za jedrenje

U ovom dijelu biti će dan pregled pojedinih geometrijskih parametara, čijim promjenama se bitno utječe na karakteristike daske za jedrenje. Opisi utjecaja promjena pojedinih parametara rezultat su komentara iskusnih testnih jedriličara koji sudjeluju prilikom razvoja novih dasaka i izjava samih projektanata dasaka, te se, kao takvi, ne mogu uzeti kao dokazane činjenice.

- **Volumen**, V - najvažniji parametar kojim se opisuju daske je njihov volumen. Što je vjetar jači koriste se daske sve manjeg volumena. Također, volumen daske utječe na njezinu plovnost u neglisirajućim uvjetima. Volumeni dasaka kreću se u rasponu od 60 do 150 litara. Međutim, postoje i veće daske koje koriste početnici za učenje prvih koraka, a one mogu imati i do 300 litara.
- **Širina**, w - drugi najbitniji parametar kod daske je širina. Širina je usko povezana sa volumenom, i također, što je vjetar jači koriste se daske manje širine. Daske za natjecanje u slalomu obično su šire od dasaka za valove istoga volumena, a to im omogućava korištenje sa širim spektrom jedara, te veću efikasnost pri uvjetima vjetra promjenjive jačine. Daske su obično širine između 50 i 100 centimetara, ali postoje i ekstremno uske daske za brzinsko jedrenje, koje mogu imati širinu manju od 30 centimetara.
- **Duljina**, l - duljina je manje bitna od širine i prvenstveno utječe na upravljivost na uzburkanom moru. Obično su daske koje se koriste na jačem vjetru duže od dasaka koje se koriste na slabijem vjetru. Također, daske za slalom su kraće od dasaka za valove.
- **Debljina**, t - o debljini na pojedinim presjecima zavisi raspodjela volumena unutar daske. Slalom daske su obično deblje na krmi, što im omogućava lakše glisiranje i korištenje sa širokim spektrom jedara, dok daske za valove imaju vrlo tanku krmu, zbog bolje upravljivosti prilikom okreta.
- **Širina na krmi** (eng. *one foot off - OFO*), w_{OFO} - povećanjem širine na krmi (širina se mjeri na udaljenosti 300 mm od krme) bitno se povećava mogućnost

korištenja širokog spektra jedara, a samim time i iskoristivost daske u uvjetima promjenjivog vjetrova. Slalom daske obično imaju puno veću širinu na krmi od dasaka za valove.



Slika 4: Daska s definicijom nekih geometrijskih parametara

- **Uzdužni oblik dna (eng. *rocker line*)** - uzdužni oblik dna utječe na upravljivost daske na uzburkanom moru. Što je pramac daske više uzdignut daska je upravljivija, no u znatnoj mjeri i sporija. Daske za slalom i brzinsko jedrenje imaju ravni krmeni dio, a dio prema pramcu se malo uzdiže, dok daske za valove imaju uzdignut krmeni (eng. *tail kick*) i pramčani dio.

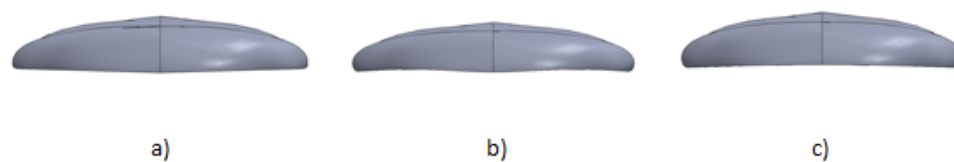


Slika 5: Uzdužni oblik dna daske za jedrenje

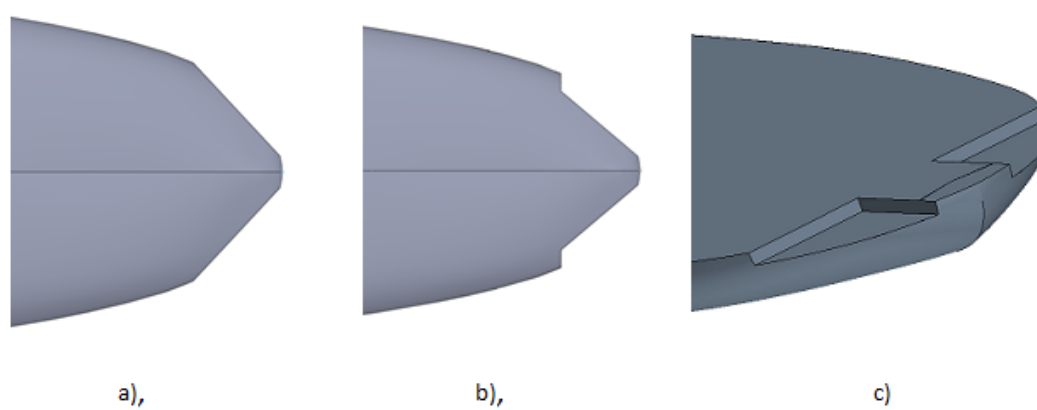
- **Poprečni oblika dna** - kod dasaka za jedrenje koriste se tri poprečna oblika dna: ravni V, monokonkavno dno i dno s dvostrukom konkavom. Dno s ravnim V-om ima

izraženi srednji hrbat od kojeg se dno daske konstantnim kutom uzdiže prema rubovima. Monokonkavno dno u središnjem djelu ima udubljenje, te ide sve niže prema rubovima. Dno s dvostrukom konkavom ima središnji hrbat, kojem se sa obe strane nalaze konkavna udubljenja. Daske s izraženim V-om imaju dobru upravljivost, s dvostrukom konkavom imaju najbolju upravljivost, a daske s monokonkavnim dnom imaju najveću maksimalnu brzinu i ubrzanje, ali i lošiju upravljivost.

- **Oblik krme** - kod današnjih slalom dasaka projektanti na krmenom dijelu rade razne isječke u svrhu smanjenja površine u kontaktu s vodom, a time i smanjenja sile otpora. Standardno se koriste isječci (eng. *cutouts*), bočni isječci (eng. *sidecuts*) i bočna suženja (eng. *wingers*). Kod dasaka za valove koristi se krma u obliku ribljeg ili lastinog repa, što pridonosi boljoj upravljivosti prilikom okreta.
- **Oblik rubnika** - oblikom rubnika se utječe na način otjecanja mora s dna daske, oštrij rubnik smanjuje otpor daske, ali smanjuje i upravljivost



Slika 6: Poprečni oblici dna daske za jedrenje, a)ravni V, b)dvostruka konkava i c)monokonkava



Slika 7: Oblici krmenog dijela daske za jedrenje, a)bočni isječci, b)bočna suženja i c)isječci

3 Matematičke osnove numeričkih metoda za simulaciju strujanja sa slobodnom površinom

U sljedećem poglavlju biti će opisana implementacija metode kontrolnih volumena i VOF modela za opisivanje slobodne površine u računalni program STAR-CCM+.

3.1 Metoda kontrolnih volumena

Metoda kontrolnih volumena se koristi za diskretizaciju jednadžbi koje opisuju strujanje fluida, kako bi ih se moglo riješiti numerički. Metoda kontrolnih volumena se sastoji od integriranja jednadžbi koje opisuju strujanje po svakom kontrolnom volumenu, što rezultira diskretiziranim jednadžbama, u kojima su sve veličine očuvane. Diskretizacija jednadžbi može biti najlakše prikazana ako razmatramo stacionarnu jednadžbu transporta skalarne veličine ϕ . To je pokazano sljedećom jednadžbom, zapisanom u integralnom obliku za proizvoljni kontrolni volumen V :

$$\oint_{S_V} \rho \phi \vec{v} d\vec{A} = \oint_{S_V} \Gamma \phi \nabla \phi d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (1)$$

gdje je

- ρ = gustoća
- \vec{v} = vektor brzine
- \vec{A} = vektor površine
- Γ_ϕ = koeficijent difuzije veličine ϕ
- $\nabla \phi$ = gradijent veličine ϕ
- S_ϕ = izvor veličine ϕ po jedinici volumena

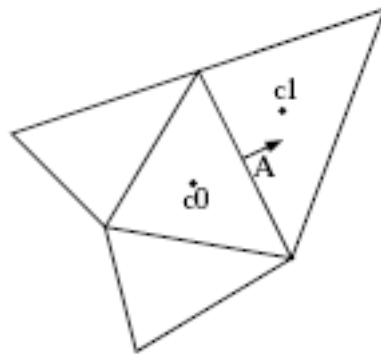
Jednadžba (1) se primjenjuje na svaki kontrolni volumen u računalnoj domeni. Primjer dvodimenzionalnog trokutastog kontrolnog volumena je prikazan na Slici 8. Diskretizirana jednadžba za dani kontrolni volumen izgleda

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_f \vec{A}_f + S_\phi V \quad (2)$$

gdje je

- N_{faces} = broj površina koje zatvaraju kontrolni volumen
- ϕ_f = vrijednost veličine ϕ na površini f
- $\rho_f \vec{v}_f \vec{A}_f$ = maseni protok kroz površinu
- \vec{A}_f = vrijednost površine f
- $(\nabla \phi)_f$ = vrijednost gradijenta $\nabla \phi$ na površini f
- V = volumen kontrolnog volumena

Jednadžbe koje opisuju strujanje fluida imaju oblik jednadžbe (2), i mogu se diskretizirati na višedimenzionalnim, nestrukturiranim mrežama sastavljenim od proizvoljnih poliedara.



Slika 8: Kontrolni volumen korišten za prikaz jednadžbe transporta skalarne veličine

Diskretne vrijednosti skalarne veličine ϕ spremaju se u centru volumena (c_0 i c_1 na Slici 8.). Međutim, površinske vrijednosti ϕ_f su potrebne za konvekcijski dio jednadžbe (1), i moraju biti interpolirane iz vrijednosti u centrima volumena. To se radi korištenjem sheme diferencije. Unutar računalnog programa STAR-CCM+ moguće je korištenje uzvodne sheme prvog reda točnosti i uzvodne sheme drugog reda točnosti. Uzvodno, znači, da je površinska vrijednost ϕ_f izvedena iz vrijednosti u uzstrujnom, ili "uzvodnom", volumenu u odnosu na smjer normalne komponente brzine $v_n = \vec{v}_f \vec{A}_f / |\vec{A}_f|$ u jednadžbi (2).

3.1.1 Uzvodna shema prvog reda točnosti

Kada se koristi uvodna shema prvog reda točnosti, veličine na površinama volumena se izračunavaju na način, da se pretpostavi da vrijednost neke varijable u centru volumena predstavlja prosjek vrijednosti u volumenu i ta vrijednost se koristi po cijelom volumenu. Kada se koristi uzvodna shema prvog reda točnosti, površinska vrijednost ϕ_f se postavi na vrijednost jednaku veličini ϕ u središtu susjednog uzvodnog volumena.

3.1.2 Uzvodna shema drugog reda točnosti

Kada se koristi uzvodna shema drugog reda točnosti, vrijednosti na površinama volumena se računaju korištenjem pristupa višedimenzionalne linearne rekonstrukcije. U ovom pristupu, točnost visokog reda je postignuta na površinama volumena razvojem u Taylorov red rješenja u središtu volumena oko središta volumena. Iz toga razloga, kada koristimo uzvodnu shemu drugog reda, vrijednost na površinama ϕ_f se računa koristeći sljedeći izraz:

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi\Delta\vec{s} \quad (3)$$

gdje su ϕ i $\nabla\phi$ vrijednost i njezin gradijent u središtu uzvodnog volumena, a $\Delta\vec{s}$ je vektor između središta uzvodnog volumena i središta površine volumena f . Ova formulacija zahtijeva određivanje gradijenta $\nabla\phi$ za svaki volumen. Gradijent se računa korištenjem teorema o divergenciji, koji se u diskretiziranoj formi može zapisati pomoću izraza:

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{faces}} \tilde{\phi}_f \vec{A} \quad (4)$$

gdje se površinske vrijednosti $\tilde{\phi}_f$ računaju linearnom interpolacijom vrijednosti ϕ , u dva volumena susjedna površini.

3.1.3 Linearizirana forma diskretiziranih jednadžbi

Diskretizirana skalarna transportna jednadžba (2) sadrži nepoznatu skalarnu varijablu ϕ u središtu volumena, a nakon primjene sheme diferencije i nepoznate vrijednosti u susjednim volumenima. Jednadžba, u općem slučaju može biti nelinearna s obzirom na

ovu varijablu. Linearizirani oblik jednadžbe (2) može se zapisati

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (5)$$

gdje se indeks nb odnosi na susjedne volumene, a a_p i a_{nb} su linearizirani koeficijenti za ϕ i ϕ_{nb} . Broj susjeda za svaki volumen ovisi o topologiji mreže, ali je uobičajeno jednak broju površina koje zatvaraju volumen (rubni volumeni su iznimka).

Slična jednadžba može biti zapisana za svaki volumen u mreži. Rezultat je sustav algebarskih jednadžbi, koji ima rijetku matricu sustava. Za skalarne jednadžbe, STAR-CCM+ rješava ovaj linearni sustav koristeći implicitnu Gauss-Seidel metodu u sprezi s algebarskom multigrid metodom.

3.1.4 Podrelaksacija

Zbog nelinearnosti sustava jednadžbi koje se rješavaju, potrebno je kontrolirati promjenu ϕ . To se obično postiže korištenjem podrelaksacije, čime se smanjuje promjena ϕ izračunata tokom svake iteracije. U jednostavnom obliku, nova vrijednost varijable ϕ unutar volumena ovisi o staroj vrijednosti ϕ_{old} , izračunatoj promjeni $\Delta\phi$, i faktoru podrelaksacije, α , kako slijedi:

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta\phi \quad (6)$$

3.1.5 Vremenska diskretizacija

Za nestacionarne simulacije, jednadžbe koje opisuju strujanje fluida treba diskretizirati po prostoru, i po vremenu. Prostorna diskretizacija za vremenski ovisne jednadžbe, je jednaka kao u stacionarnom slučaju. Vremenska diskretizacija uključuje integraciju svakog člana u diferencijalnoj jednadžbi po vremenskom koraku Δt . Integracija nestacionarnih izraza je jednosmjerna. Opća formulacija za vremenski razvoj varijable ϕ je dana sljedećim izrazom

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (7)$$

gdje funkcija F uključuje bilo kakvu prostornu diskretizaciju. Ako vremensku derivaciju diskretiziramo koristeću shemu unatrag, diskretizacija prvog reda točnosti može se zapisati

izrazom,

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (8)$$

a diskretizacija drugog reda točnosti izrazom,

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi) \quad (9)$$

gdje je

- ϕ = skalarna veličina
- $n + 1$ = sljedeći vremenski korak
- n = trenutni vremenski korak
- $n - 1$ = prethodni vremenski korak

Jednom kada je vremenska derivacija diskretizirana, treba izabrati način opisivanja funkcije $F(\phi)$ (implicitna i eksplicitna vremenska integracija).

Kod implicitne integracije ϕ^{n+1} u promatranom volumenu je vezan s ϕ^{n+1} u susjednom volumenu preko $F(\phi^{n+1})$:

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^{n+1}) \quad (10)$$

Implicitna jednadžbamože biti rješavana iterativno u svakom vremenskom koraku prije prelaska na sljedeći. Prednost potpuno implicitne sheme je bezuvjetna stabilnost s obzirom na veličinu vremenskog koraka.

Kod eksplicitne integracije ϕ^{n+1} može biti izražen eksplicitno korištenjem vrijednosti postojećeg rješenja, ϕ^n :

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^n) \quad (11)$$

Kod korištenja eksplicitne integracije, Δt je ograničen stabilnošću rješavača (veličina vremenskog koraka ograničena je Courant-Friedrich-Lewy uvjetom). Eksplicitna integracija se uglavnom koristi za rješavanje tranzijentnog ponašanja pomičnih valova, poput udarnog vala, jer je točnija i manje računalno zahtjevnja od implicitne sheme u tim slučajevima.

3.2 VOF model slobodne površine

U programskom paketu STAR-CCM+ za opisivanje problema višefaznog strujanja postoje tri modela:

- Volume of Fluid (VOF) model
- Model smjese
- Eulerovski model

VOF model je prikladan za slojevite probleme i probleme sa slobodnom površinom, dok su model smjese i Eulerovski model, pogodni za probleme u kojima se faze miješaju ili odvajaju, ili gdje volumni udio disperziranog fluida prelazi 10 %.

VOF formulacija se temelji na činjenici da dva ili više fluida (ili faza), međusobno ne prodiru jedni u druge. Za svaku dodatnu fazu u modelu uvodi se nova varijabla: volumni udio faze u kontrolnom volumenu. U svakom volumenu, volumni udjeli zajedno zbrojeni moraju davati jedinicu. Polja svih varijabli i svojstava se dijele po fazama, i predstavljaju volumenski uprosječene vrijednosti, sve dok su poznati volumni udjeli svih faza na svakom mjestu. Iz toga razloga, varijable i svojstva u proizvoljnom kontrolnom volumenu su, ili jednostavno vrijednosti zadane za jednu od faza, ili vrijednosti smjese faza, u ovisnosti o vrijednostima volumnih udjela. Drugim riječima, ako volumni udio q -tog fluida u konačnom volumenu označimo s α_q , tada postoje sljedeća tri stanja:

- $\alpha_q = 0$: kontrolni volumen je prazan (nema q -tog fluida)
- $\alpha_q = 1$: kontrolni volumen je pun (q -tog fluida)
- $0 < \alpha_q < 1$: ako se kontrolni volumen nalazi na granici q -tog fluida s jednim ili više drugih fluida

Temeljem lokalne vrijednosti α_q , odgovarajuća svojstva i varijable će biti dodijeljene svakom kontrolnom volumenu u domeni.

3.2.1 Jednadžba volumnih udjela

Praćenje granice(a) između faza je omogućeno rješavanjem jednadžbe kontinuiteta za volumne udjele jedne (ili više) faza. Za q -tu fazu, ova jednadžba ima sljedeći oblik:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad (12)$$

Zadana vrijednost izvorskog člana na desnoj strani jednadžbe (10) je nula, ali se može definirati za svaku fazu. Jednadžba volumnih udjela neće biti rješavana za primarnu fazu; volumni udio primarne faze će biti računat na temelju sljedećeg uvjeta:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (13)$$

3.2.2 Svojstva

Svojstva koja se pojavljuju u transportnoj jednadžbi su određena prisutnošću faza u svakom kontrolnom volumenu. U dvofaznom sustavu, na primjer, ako su faze predstavljene indeksima 1 i 2, i ako pratimo volumni udio druge faze, gustoća u svakom kontrolnom volumenu je dana izrazom

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (14)$$

Općenito, za n -fazni sustav, gustoća, uprosječena prema volumnim udjelima se može zapisati:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (15)$$

Sva ostala svojstva računaju se na isti način.

3.2.3 Jednadžba količine gibanja

Jedna jednadžba količine gibanja se rješava po cijeloj domeni, i rezultirajuće polje brzine je zajedničko za faze. Jednadžba količine gibanja, napisana ispod, je ovisna o volumnim udjelima svih faza preko svojstava ρ i μ .

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (16)$$

Jedno od ograničenja aproksimacije zajedničkih polja, je da u slučaju, gdje postoje velike razlike brzina između faza, može imati neugodnog utjecaja na točnost računatih brzina na granici.

3.2.4 Energetska jednadžba

Energetska jednadžba, također zajednička za sve faze, je prikazana jednadžbom (15).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla(k_{eff}\nabla T) + S_h \quad (17)$$

VOF model tretira energiju, E , i temperaturu, T , kao varijable uprosječene po masi:

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (18)$$

gdje se E_q za svaku fazu temelji na specifičnoj toplini te faze i zajedničkoj temperaturi. Svojstva ρ i k_{eff} (efektivna toplinska provodnost) su zajednička za faze. Izvorski član, S_h , sadrži utjecaj zračenja, i drugih volumenskih izvora topline.

Kao i kod polja brzine, točnost temperatura blizu granica je ograničena u slučaju postojanja velikih razlika u temperaturi između faza. Takvi problemi se javljaju i u slučaju kad se svojstva faza razlikuju za nekoliko redova veličine. Na primjer, ako problem uključuje rastaljeni metal u kombinaciji sa zrakom, toplinska provodnost materijala se može razlikovati za četiri reda veličine. Takvi veliki nesrazmjeri svojstava mogu dovesti do sustava jednadžbi s neizotropnim koeficijentima, što može dovesti do ograničenja točnosti i konvergencije.

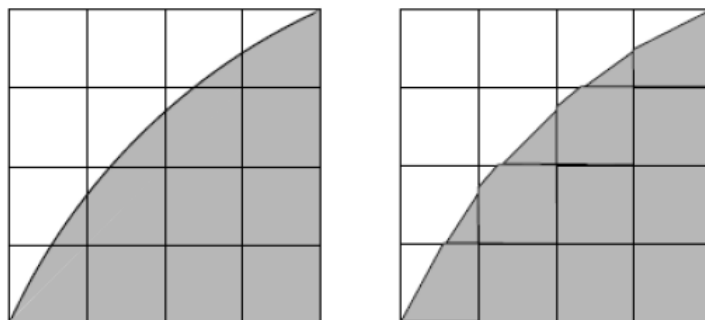
3.2.5 Dodatne skalarne jednadžbe

Ovisno o definiciji problema, dodatne skalarne jednadžbe mogu biti uključene u rješavanje problema. U slučaju turbulentnih veličina, rješava se jedan sustav transportnih jednadžbi, a turbulentne varijable (npr., k i ϵ), ili Reynoldsova naprezanja su zajednička za sve faze u domeni.

3.2.6 Interpolacija u blizini granice

Računalni program STAR-CCM+ za praćenje granice između faza koristi shemu geometrijske rekonstrukcije. U pristupu geometrijske rekonstrukcije, standardne interpolacijske sheme se koriste kako bi se izračunli površinski tokovi za kontrolne volumene u potpunosti ispunjene jednim fluidom. Kada je kontrolni volumen blizu granice dviju faza

koristi se shema geometrijske rekonstrukcije. Shema geometrijske rekonstrukcije predstavlja granicu između fluida, koristeći linearni pristup za pojedine kontrolne volumene. Ova shema je primjenjiva za općenite nestrukturirane mreže. Shema pretpostavlja linearni profil granice između dva fluida u svakom kontrolnom volumenu, i koristi linearni oblik za izračun advekcije fluida kroz površine kontrolnih volumena.



Slika 9: Stvarna granica i njezina interpolacija shemom geometrijske rekonstrukcije

3.2.7 Vremenska ovisnost

Za vremenski ovisne VOF proračune, jednačba (10) se rješava korištenjem eksplisitne vremenski marširajuće sheme. STAR-CCM+ automatski prilagođava vremenski korak integracije za jednačbu volumnih udjela, ali se na korak integracije može utjecati mijenjanjem Courantova broja. Volumni udjeli se mogu korigirati svaki vremenski korak, ili u svakoj iteraciji svih vremenskih koraka.

4 Opis računalnog modela gibanja daske za jedrenje po slobodnoj površini vode

Za provedbu numeričkih simulacija potrebno je izraditi računalni model gibanja daske po slobodnoj površini vode. U prvom koraku potrebno je u CAD programskom paketu izraditi geometrije pojedinih dasaka, a nakon toga, u programskom paketu za računalnu dinamiku fluida izraditi odgovarajući fizikalni model koji u najboljoj mjeri opisuje stvarno strujanje.

4.1 Izrada geometrijskih modela

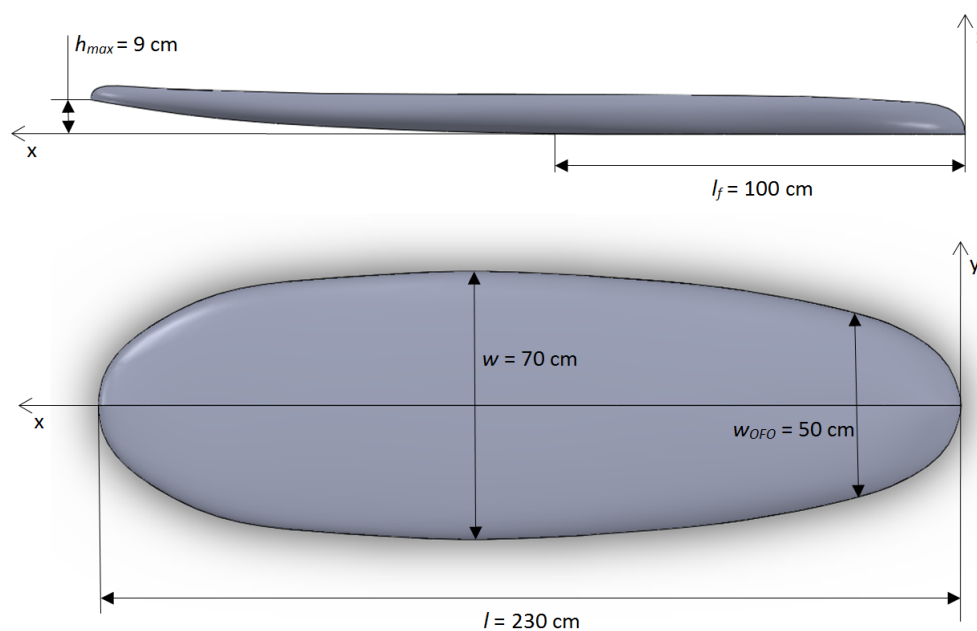
Za izradu geometrijskih modela upotrebljen je CAD programski paket Solidworks. Prvo je izrađena bazna geometrija, a pomoću nje su izrađeni svi ostali ispitivani oblici dasaka za jedrenje.

4.1.1 Bazna geometrija

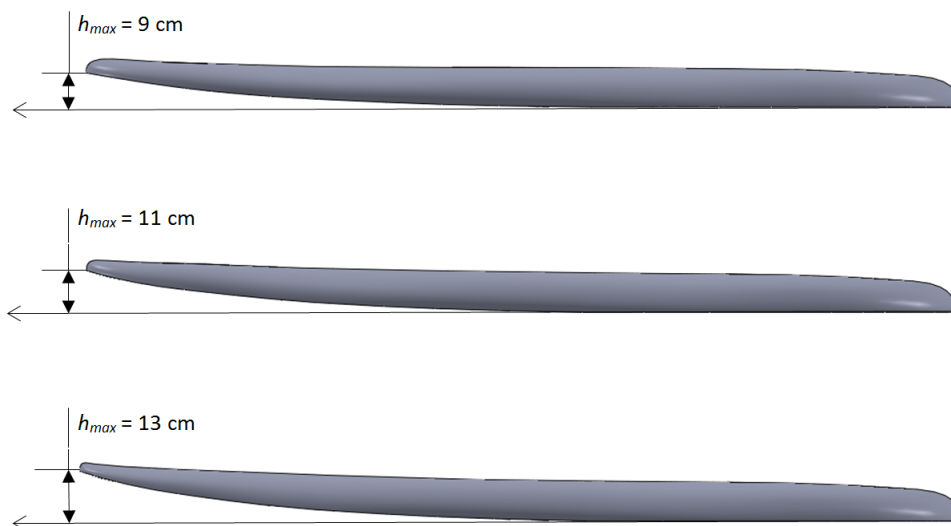
Bazni model daske se temelji na obliku dasaka koje se koriste za disciplinu slalom i ima dimenzije: duljina $l = 2300$ mm, širina $w = 700$ mm, maksimalna debljina $t = 105$ mm, širina na krmi $w_{OFO} = 500$ mm. Daska takvih dimenzija ima ukupni volumen $V = 103.33$ l. Uzdužni oblik dna definiran je na način, da je dio $l_f = 1000$ mm ispred krme, napravljen potpuno ravnim, a maksimalna visina uzdužne linije dna na pramcu iznosi $h_{max} = 90$ mm. Poprečni presjek dna je potpuno ravan, a daska na krmi ima kontinuirani oblik, bez ikakvih isječaka. Bazna geometrija daske, s osnovim geometrijskim parametrima i korištenim koordinatnim sustavom prikazana na je na slici 10.

4.1.2 Modeli s promijenjenim uzdužnim oblikom dna

Prvi parametar geometrije daske za jedrenje čija se promjena proučava u ovom radu je uzdužni oblik dna. Napravljeni su dva dodatna modela s različitim uzdužnim oblicima dna. U odnosu na bazni model promijenjene su maksimalne visine uzdužne linije dna na pramcu i one iznose $h_{max} = 110$ mm, odnosno $h_{max} = 130$ mm. Ravni dio ispred krme



Slika 10: Bazna geometrija daske s osnovnim geometrijskim parametrima

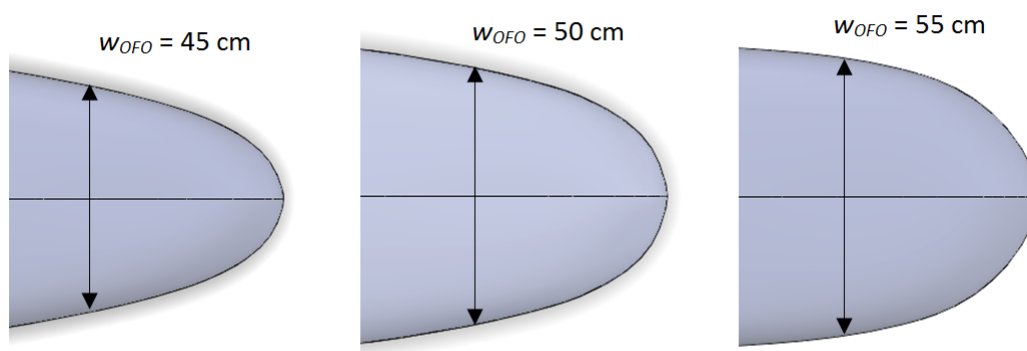


Slika 11: Modeli s različitim uzdužnim oblikom dna

je isti kao na baznom modelu, i njegova dužina iznosi $l_f = 1000$ mm. Bazni model i dva dodatna modela su prikazani na slici 11.

4.1.3 Modeli s promijenjenom širinom na krmi

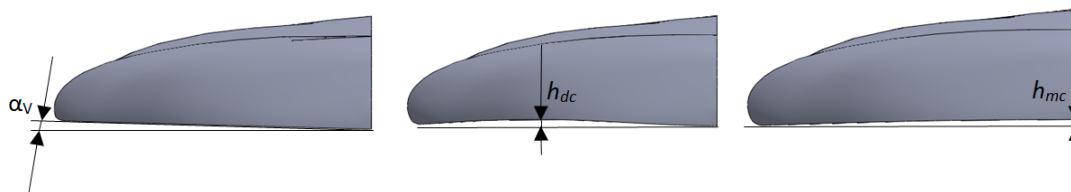
Sljedeći parametar geometrije daske za jedrenje čija se promjena proučava je širina daske na krmi. Napravljena su dva modela daske s različitim širinama na krmi. Vrijednosti širine na krmi za napravljene modele iznose $w_{OFO} = 450$ mm, odnosno $w_{OFO} = 550$ mm. Modeli su prikazani na slici 12.



Slika 12: Modeli s različitom širinom na krmi

4.1.4 Modeli s različitim poprečnim oblikom dna

Napravljeni su modeli s tri različite vrste poprečnog presjeka dna; ravni V, dvostruka konkava i monokonkava. Za svaku od vrsta poprečnog presjeka dna napravljena su po tri modela. Kod modela s ravnim V-om promjena je definirana kutom nagiba poprečne linije dna α_V , a taj kut za pojedine modele iznosi: 0.5° , 1° i 1.5° . Kod modela s dvostrukom konkavom promjena je definirana dubinom konkave h_{dc} , na polovici maksimalne širine daske, a dubina konkava za pojedine modele iznosi: 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm. Kod modela s monokonkavom promjena je definirana dubinom konkave na centralnoj liniji dna daske h_{mc} , a dubina konkave za pojedine modele iznosi: 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm. Prikaz vrsta poprečnih presjeka s načinom definiranja promjena prikazan je na slici 13.

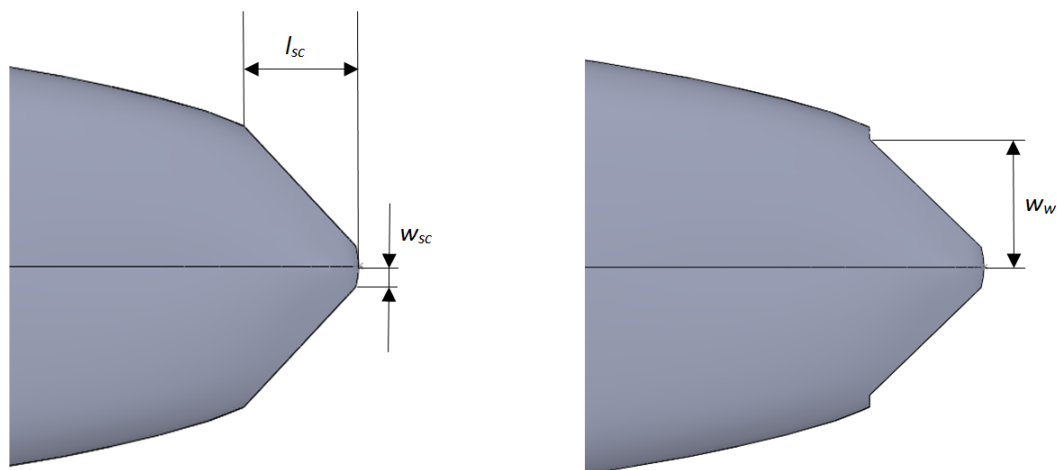


Slika 13: Modeli s različitim poprečnim presjekom dna i načinom definiranja promjena geometrije

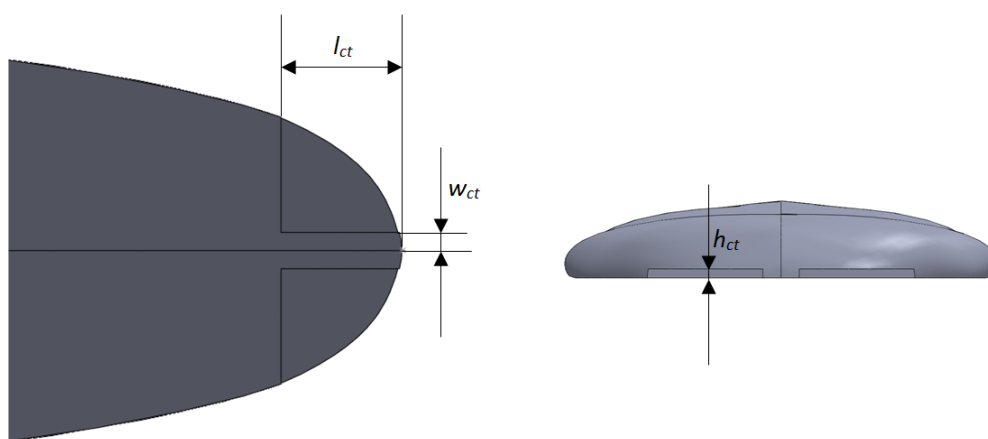
4.1.5 Modeli s različitim oblicima krmenog dijela

Napravljeni su modeli s četiri različita oblika krmenog dijela. Napravljena su dva modela s različitom veličinom bočnih isječaka, koji su definirani preko duljine bočnog isječka l_{sc} , i širine bočnog isječka w_{sc} . Veći bočni isječak ima dimenzije $l_{sc} = 170$ mm i $w_{sc} = 30$ mm, a manji ima dimenzije $l_{sc} = 120$ mm i $w_{sc} = 50$ mm. Nadalje, napravljena su četiri modela s isječcima, koji su definirani preko parametara: duljine isječka l_{ct} , širine isječka w_{ct} i dubine isječka h_{ct} . Veliki isječak je dimenzija $l_{ct} = 200$ mm i $w_{ct} = 30$ mm, a mali je dimenzija $l_{ct} = 150$ mm i $w_{ct} = 50$ mm. Dubine isječaka su 10 i 15 mm. Napravljena su tri modela s kombinacijom bočnih isječaka i bočnih suženja. Kod tih modela koristi se veći bočni isječak, a bočno suženje je definirano širinom suženja w_w . Korištene vrijednosti bočnih suženja su 140, 160 i 170 mm. Također, napravljena su dva modela s kombinacijom svih gore navedenih promjena na krmi. Prvi ima veliki duboki isječak, veliko bočno suženje i veliki bočni isječak, dok drugi ima mali plitki isječak, malo bočno suženje i mali bočni isječak. Modeli s načinom definiranja geometrije su prikazani na slikama 14. i 15.

Sveukupno je za potrebe ispitivanja napravljeno 9 kategorija promjena oblika, i ukupno 25 modela. Sve promjene su bazirane na različitim tržišno dostupnim modelima dasaka za slalom, te je cilj numeričkih simulacija odrediti koja od ispitivanih promjena ima najbolji utjecaj na karakteristike tražene kod dasaka za slalom, a to su postizanje maksimalne brzine po pravcu (oblik daske s najmanjim otporom) i omogućavanje ranog glisiranja (oblik daske s najvećim uzgonom).



Slika 14: Modeli s bočnim isječcima i bočnim suženjima, s načinom definiranja geometrije



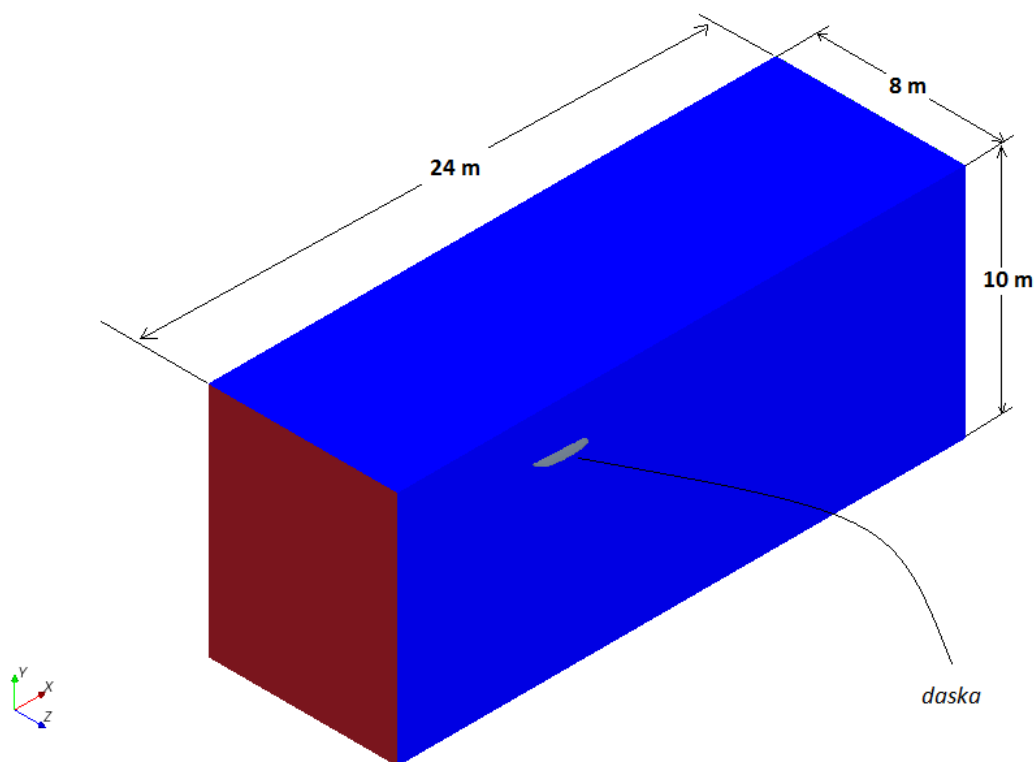
Slika 15: Model s isječkom s načinom definiranja geometrije

4.2 Izrada numeričkog modela

Za izradu numeričkog modela upotrebljen je paket za računalnu dinamiku fluida STAR-CCM+. Unutar njega napravljena je diskretizacija mrežom kontrolnih volumena, postavljen je prikladan fizikalni model, zadani odgovarajući rubni uvjeti i početna pretpostavka rješenja, te napravljena sama simulacija stacionarnog strujanja.

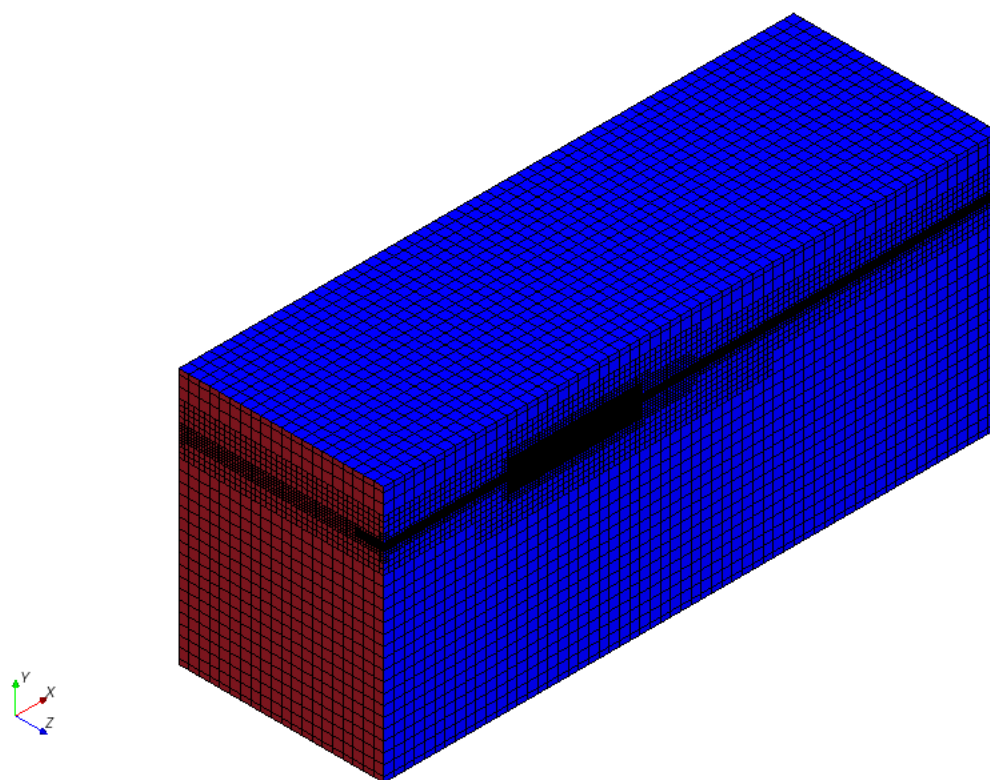
4.2.1 Definiranje računalne domene i računalne mreže

Zbog simetričnosti promatranog problema (geometrije i rubnih uvjeta) za razmatranje je uzeta samo polovica daske, te je u skladu s tim napreavljena i računalna domena. Domena se pruža 8 m ispred ishodišta koordinatnog sustava, koji je smješten u točku na dnu krmenog dijela daske, te 16 m iza, tako da strujanje fluida na izlasku iz domene ne bi imalo utjecaja na strujanje fluida u promatranom području oko daske. Širina domene je 8 m, visina iznad daske je 2 m, a dubina 8 m. Domena je prikazana na slici 16. Unutar ra-

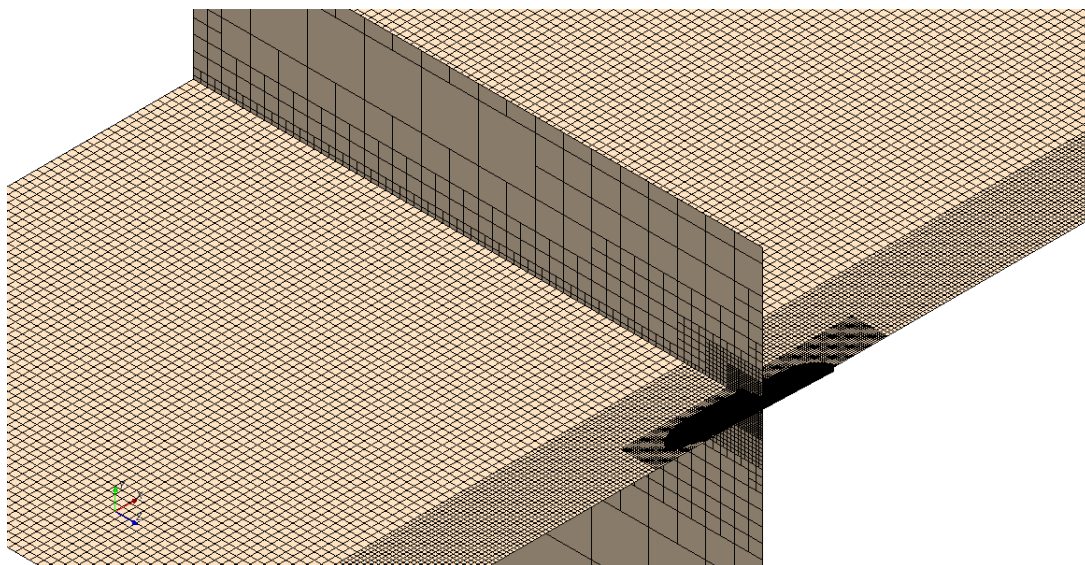


Slika 16: Računalna domena

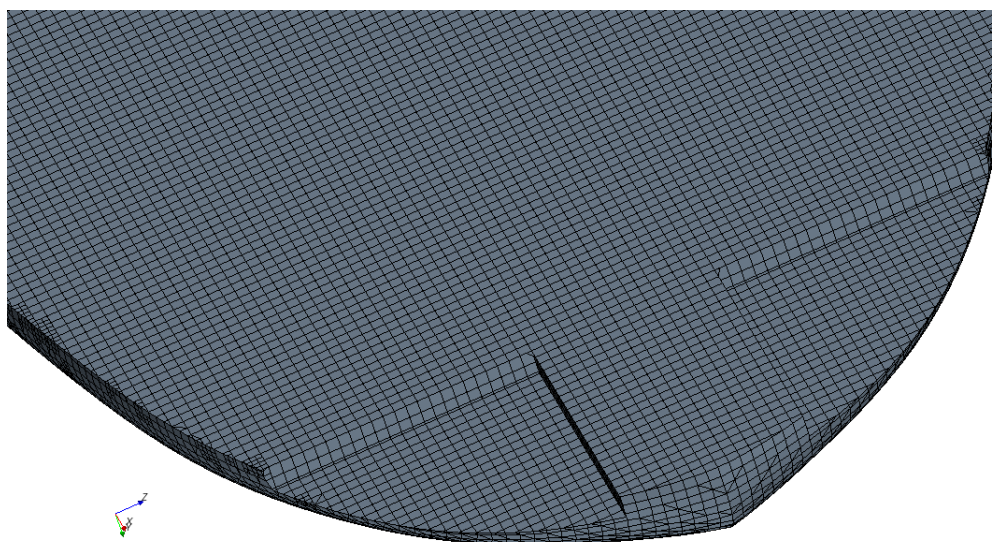
čunalnog programa STAR-CCM+ domena je diskretizirana mrežom kontrolnih volumena. Mreža je napravljena na način da područje uz dasku bude fino diskretizirano, te da diskretizacija postepeno postaje sve grublja prema rubovima domene. Također, dio domene gdje se očekuje postojanje slobodne površine mora biti fino diskretiziran, radi točnijeg opisa ponašanja slobodne površine. Na taj način, najsitniji volumeni uz dasku imaju veličinu $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, volumeni u području gdje se očekuje slobodna površina $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, dok najveći volumeni na rubovima domene imaju veličinu $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$. Prema tim načelima, stvorena je nestrukturirana mreža s ukupno 306000 heksaedarskih kontrolnih volumena (unutar programa STAR-CCM+ ovakvi volumeni se nazivaju *trimmer* volumeni). Takvim brojem kontrolnih volumena postiže se kompromis između dovoljne točnosti rješenja i računalnog vremena potrebnog za provođenje simulacija na dostupnom računalu. Mreža kontrolnih volumena prikazana je na slikama 17., 18. i 19.



Slika 17: Diskretizacija na rubovima domene



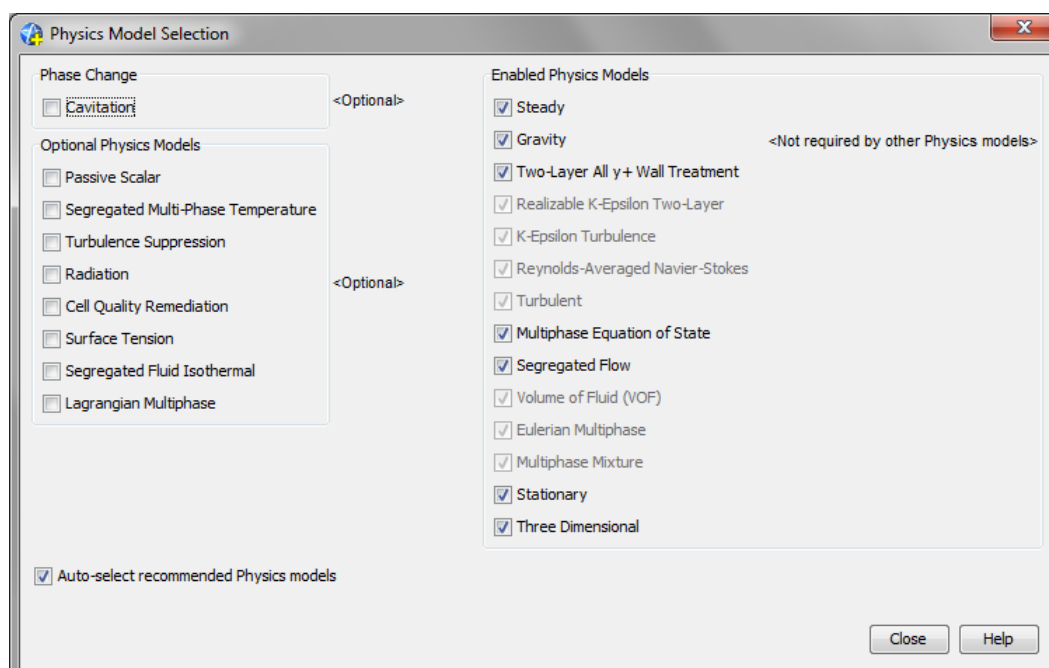
Slika 18: Područje finije diskretizacije uz dasku i slobodnu površinu



Slika 19: Diskretizacija na površini daske

4.2.2 Fizikalni model

Simulacije su provedene korištenjem stacionarnog rješavača za dvofazno turbulentno nestlačivo strujanje. Za modeliranje turbulencije korišten je standardni $k - \varepsilon$ model turbulencije sa standardnim zidnim funkcijama, te s ponuđenim konstantama modela. Za praćenje granice između dvaju fluida (vode i zraka) korišten je VOF model višefaznog strujanja. Korišten je sekvencijalni (eng. *segregated*) rješavač i SIMPLE metoda rješavanja veze između tlaka i brzine.



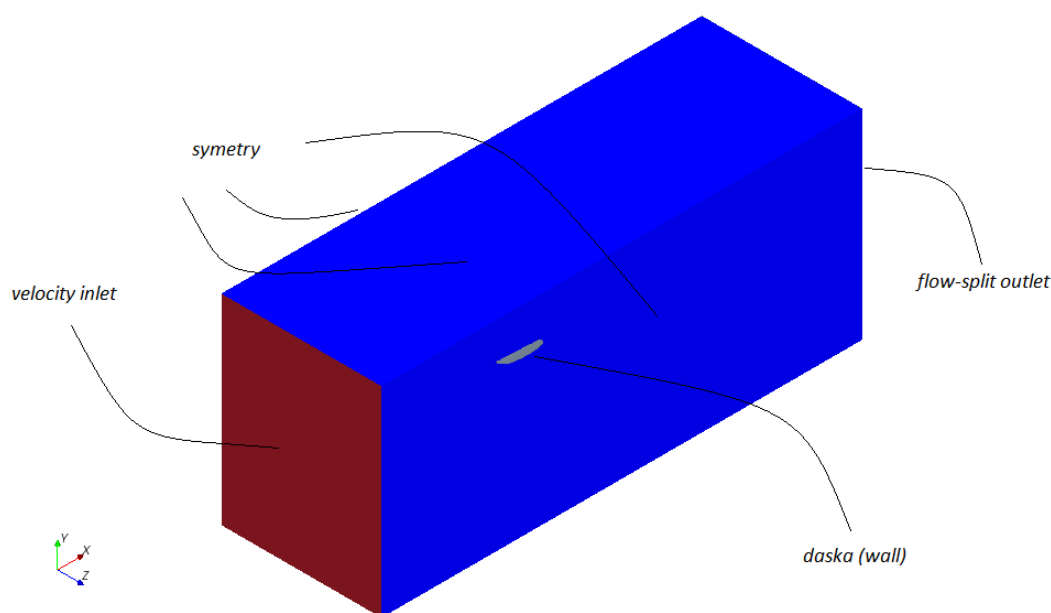
Slika 20: Odabir fizikalnog modela

4.2.3 Rubni uvjeti

Bočne stranice domene, te gornja i donja stranica, definirane su kao rubni uvjeti simetrije (*symetry plane*). Prednja stranica je definirana kao ulaz fluida (*velocity inlet*), na kojem je definirana konstantana brzina strujanja od 15 m/s, i za vodu i za zrak po cijeloj ulaznoj površini. Također, na prednjoj strani se definira visina do koje u domenu ulaze pojedine faze, a to je moguće preko korisnički definiranih funkcija (*user field function*). Stražnji dio domene je definiran kao izlaz fluida (*flow-split outlet*), na kojem nije potrebno

zadavati dodatne uvjete. Sama daska je definirana kao glatki zid (*wall*).

Na početku simulacije, na području cijele domene zadana je konstantna brzina vode i zraka, i to 15 m/s u smjeru normale na površinu, a pomoću korisnički definirane funkcije određena je rasprostranjenost pojedinih fluida, tj, položaj slobodne površine, koja predstavlja horizontalnu ravninu na visini 2 cm iznad ravnine $y = 0$ (što ujedno predstavlja dubinu urona daske). Također, u model je uključeno i gravitacijsko ubrzanje, zbog njegovog utjecaja na izgled slobodne površine.



Slika 21: Rubni uvjeti

5 Prikaz i analiza rezultata numeričkih simulacija

Sveukupno su provedene simulacije za 25 različitih oblika daske, a vrste promjena podijeljene su u devet kategorija:

- daske s različitim uzdužnim oblicima dna
- daske s različitim širinama na krmi
- daske s poprečnim oblicima dna u obliku ravnog V-a
- daske s poprečnim oblicima dna u obliku dvostruke konkave
- daske s poprečnim oblicima dna u obliku monokonkave
- daske s bočnim isječcima
- daske s bočnim isječcima i bočnim suženjima
- daske s isječcima
- daske s bočnim isječcima, isječcima i bočnim suženjima

Za sve simulacije korištena je ista pozicija daske, koja je definirana kutom nagiba od $\alpha = 2^\circ$, i dubinom urona na krmi od $b = 2$ cm. Simulacije su provedene na računalu s četverojezgrenim procesorom, s brzinom 2.4 GHz po jezgri. Jednadžbe unutar svake simulacije su rješavane samo uzvodnom shemom prvog reda točnosti, jer je prilikom rješavanja shemom drugog reda točnosti, kod pojedinih modela dolazilo do nestabilnosti prilikom postupka iteriranja. Nakon dobivenog rješenja za baznu geometriju daske, ono je korišteno kao inicijalno rješenje za sve ostale geometrije. Takvom metodom rješavanja, za dobivanje rezultata jedne simulacije bilo je potrebno oko 5 sati računalnog vremena.

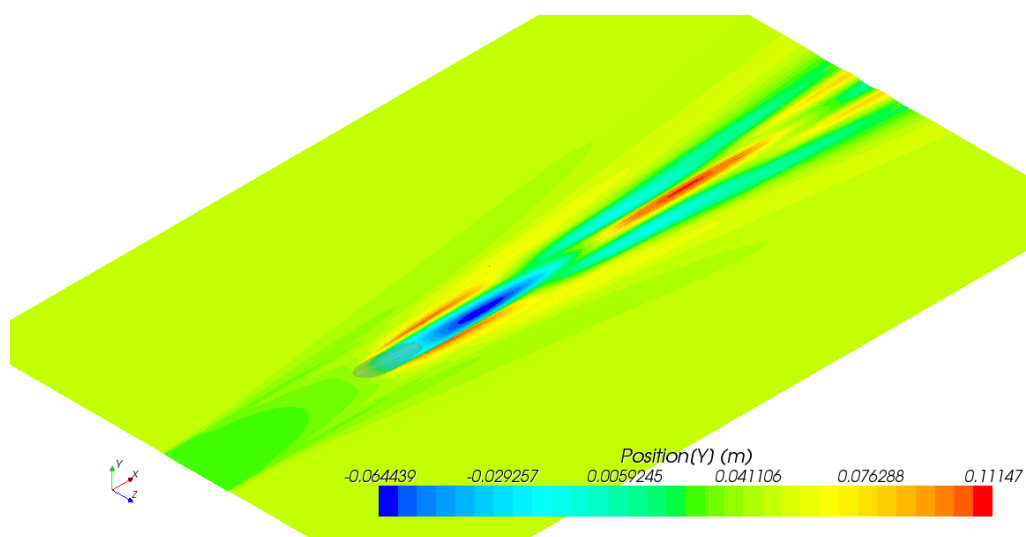
Tijekom iteriranja reziduali su monotono padali, ali zbog jako sporog pada reziduala jednadžbe volumnih udjela, kao glavni kriteriji konvergencije korišteni su monitori sile otpora i sile uzgona na površini daske, te se njihovim monotonim približavanjem stacionarnoj vrijednosti određivala dovoljna točnost rješenja.

Analizom rezultata simulacija za pojedine pozicije može se primijetiti da oblici rezultirajućih slobodnih površina, polja brzine i tlaka na pojedinim presjecima, te polja

ostalih fizikalnih veličina, imaju sličan, karakterističan izgled, te radi preglednosti neće ih se pojedinačno prikazivati, već se mogu objasniti na primjeru modela s baznom geometrijom. Prilikom analize rezultata za pojedine modele geometrija, biti će prikazana polja fizikalnih veličina koja se u znatnoj mjeri razlikuju od onih, dobivenih za model s baznom geometrijom.

5.1 Model s baznom geometrijom

Najočitiji parametar kojim se može potvrditi valjanost rješenja je oblik slobodne površine. Oblik slobodne površine za sve slučajeve prikazuje val koji nastaje na bočnim stranama daske, na mjestima gdje daska počinje uranjati u vodu. Slika vala iza daske je karakteristična za glisirajuće gibanje plovila po površini vode. Iza krme se pojavljuje područje valne udoline, iza koje dolazi do spajanja brijegova valova s bočne strane daske. Počinje razvoj bočnih valova i krmenog vala, što je očekivana pojava kod glisirajućeg gibanja. Ovakav oblik slobodne površine karakterističan je za sve ispitivane geometrije, ali za neke geometrije pojavljuje se primjetne razlike u dijelu neposredno iza krme, koje će biti prikazane u analizi pojedinih geometrija. Karakteristične slike slobodne površine prikazane su na slikama 22., 23. i 24., a slika slobodne površine na ravnini simetrije prikazana je na slici 25.



Slika 22: Karakteristični izgled slobodne površine - izometrija

Polje brzine na slobodnoj površini, također, ima karakterističnu sliku, gdje se vidi područje smanjene brzine na mjestima intenzivnijeg kontakta daske sa slobodnom površinom, te na djelovima slobodne površine na kojima dolazi do izraženih poremećaja (slika 26.).

Na slici 27. prikazano je polje brzine na ravnini simetrije, kod kojeg možemo uočiti očekivanu pojavu manjih brzina na porostoru između daske i slobodne površine, gdje dolazi do usporavanja strujanja zraka, i područje većih brzina na nosu, gdje struja zraka ubrzava. Također, iza same daske brzina strujanja je smanjena.

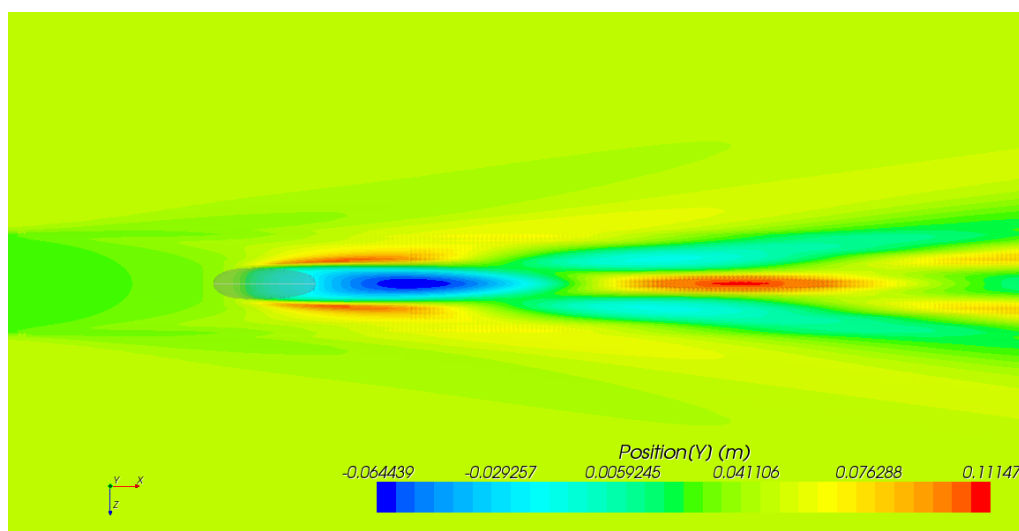
Na slikama 28. i 29. prikazano je polje brzine na ravninama $x = 0$ m i $x = -1$ m. Na njima možemo jasno uočiti područje smanjene brzine na područjima gdje postoji utjecaj slobodne površine i utjecaj daske.

Na slici 30. prikazana je raspodjela tlaka na ravnini simetrije. Jasno se uočava područje povećanog tlaka na mjestu gdje daska dolazi u kontakt sa slobodnom površinom. Također, na samoj površini daske može se vidjeti da je tlak najveći na mjestu inicijalnog kontakta sa slobodnom površinom (slike 31. i 32.).

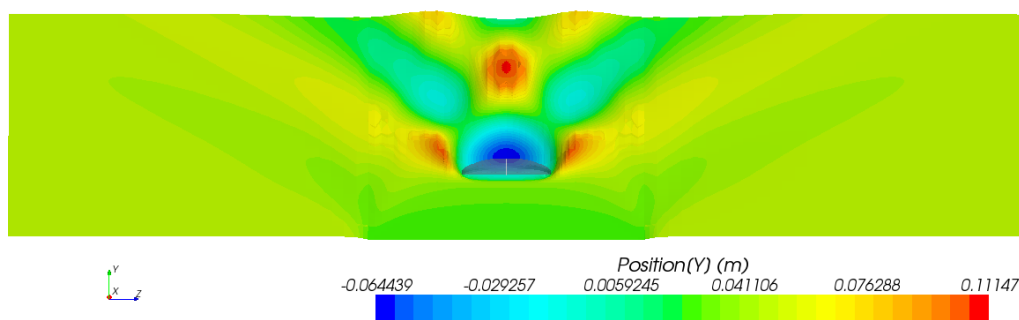
Sila otpora (F_D) svakog plovila, pa tako i daske za jedrenje, djeluje u pravcu gibanja fluida i sastoji se od dva dijela. Prvi dio je otpor trenja (F_{DV}), koji je prouzročen smičnim naprezanjima po površini daske, koja su posljedica viskoznosti fluida. Otpor trenja, pri konstantnoj brzini, povećava se povećanjem površine daske koja je u kontaktu s vodom. Razlika između ukupne sile otpora i otpora trenja, naziva se preostalim otporom (F_{DP}). Preostali otpor sastoji se od otpora valova i otpora forme (viskozni otpor tlaka). Taj dio sile otpora, ponajprije je prouzročen razlikom tlaka u području oko i iza daske.

Sila uzgona (F_L), koja djeluje okomito na brzinu strujanja fluida gotovo u potpunosti je posljedica razlike tlaka na gornjoj i donjoj površini daske.

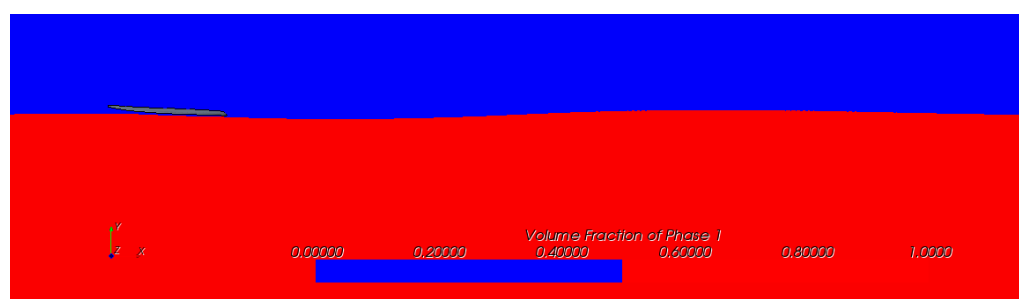
Nakon provedenih simulacija za baznu geometriju dobiveni su sljedeći iznosi sila: sila otpora, $F_D = 301.65$ N, otpor trenja, $F_{DV} = 75.29$ N, preostali otpor $F_{DP} = 226.36$ N, sila uzgona $F_L = 2316.77$ N.



Slika 23: Karakteristični izgled slobodne površine - pogled odozgo



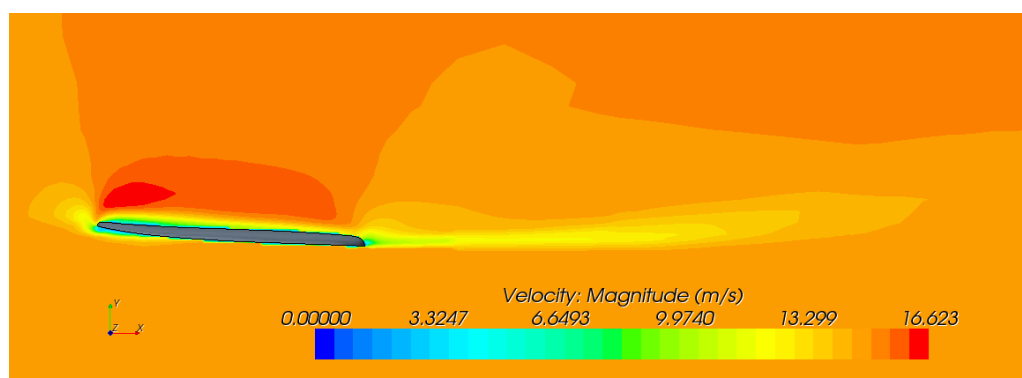
Slika 24: Karakteristični izgled slobodne površine - pogled sprijeda



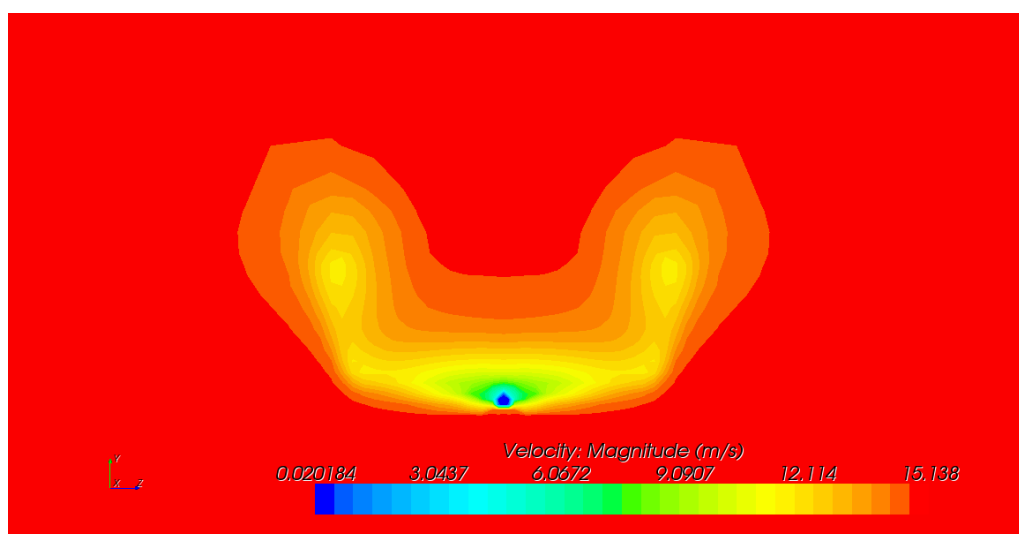
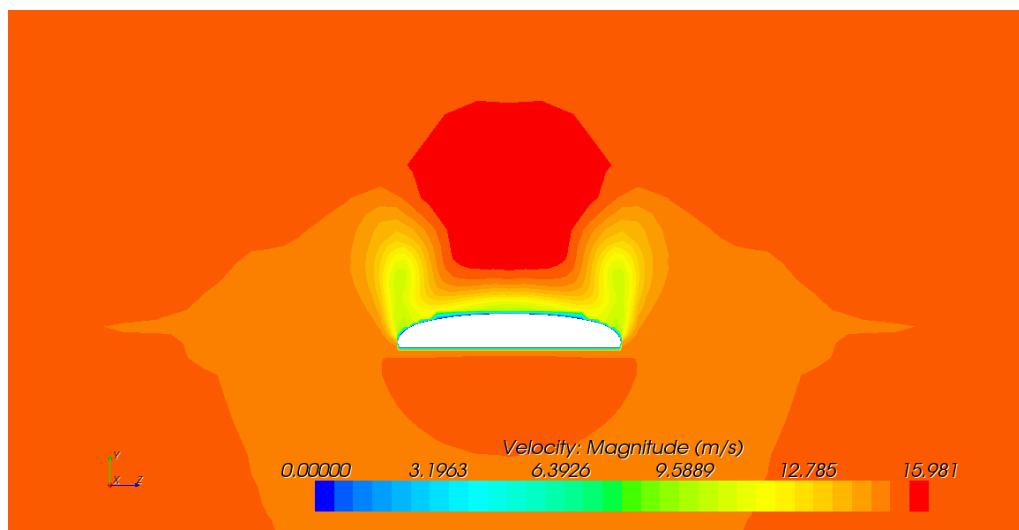
Slika 25: Karakteristični izgled slobodne površine - detalj na ravni simetrije

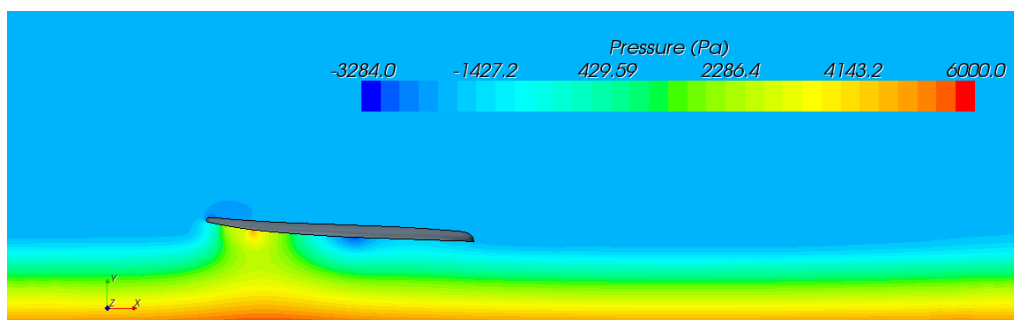


Slika 26: Polje brzine na slobodnoj površini - pogled odozgo

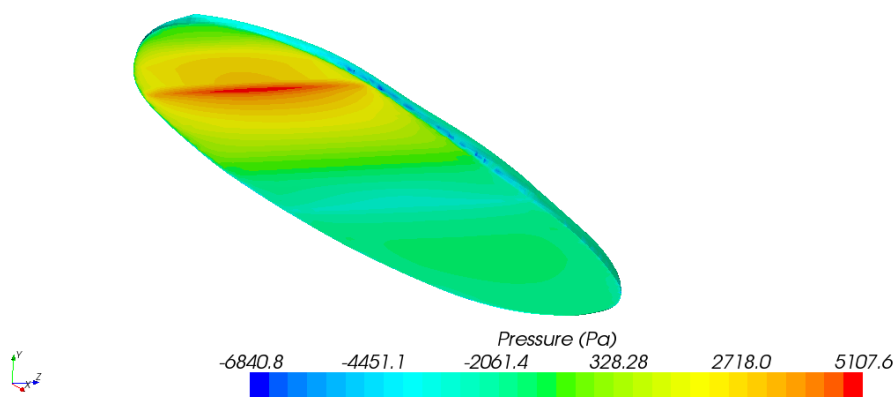


Slika 27: Polje brzine na ravni simetrije

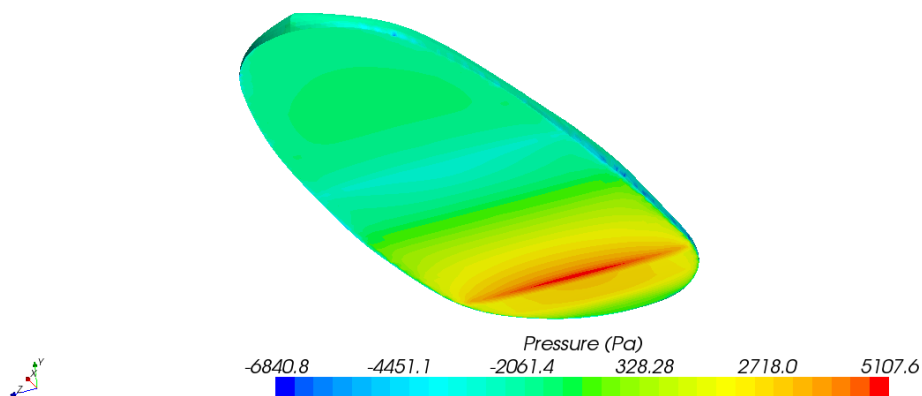
Slika 28: Polje brzine na ravnini $x = 0$ mSlika 29: Polje brzine na ravnini $x = -1$ m



Slika 30: Polje tlaka na ravnini simetrije



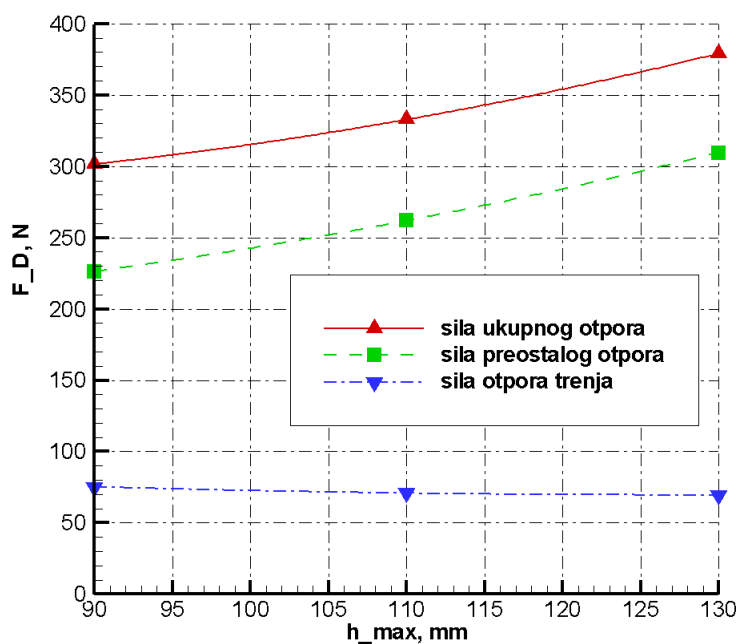
Slika 31: Polje tlaka na površini daske - pogled sprijeda



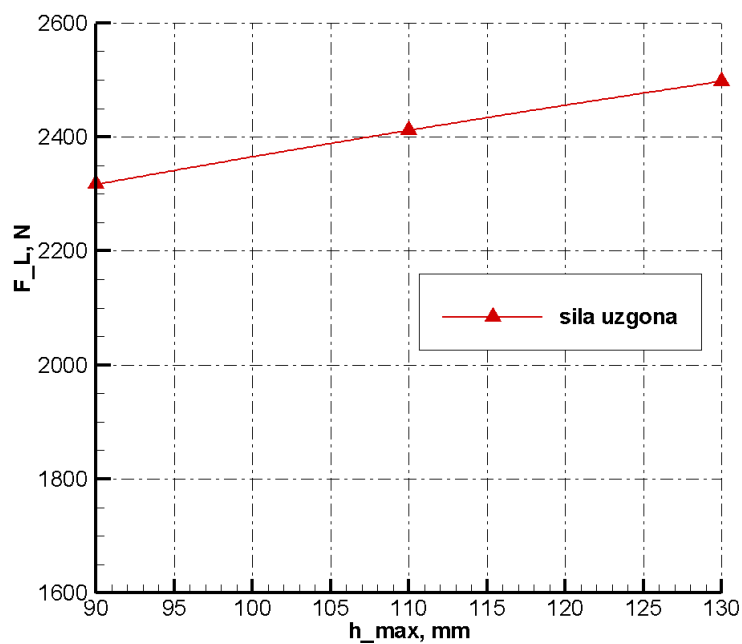
Slika 32: Polje tlaka na površini daske - pogled straga

5.2 Daske s promijenjenim uzdužnim oblikom dna

Dijagrami promjene sile otpora i uzgona prikazani su na slikama 33. i 34. Kod modela s promijenjenim uzdužnim oblikom dna može se primijetiti da s povećanjem maksimalne visine uzdužne linije dna na pramcu h_{max} , dolazi do značajnog povećanja sile otpora (kod modela s najvećom visinom pramca sila otpora je veća za 25.74%). Do povećanja ukupne sile otpora prevenstveno dolazi zbog, povećanja preostalog otpora, što se može objasniti zaustavljanjem veće količine obaju fluida (vode i zrak) u predjelu ispod pramčanog dijela daske kod modela s višim pramcem. Sila uzgona se povećanjem maksimalne visine uzdužne linije dna na pramcu, također povećava, ali manje nego sila otpora (kod modela s najvećom visinom pramca sila uzgona veća za 7.81%).



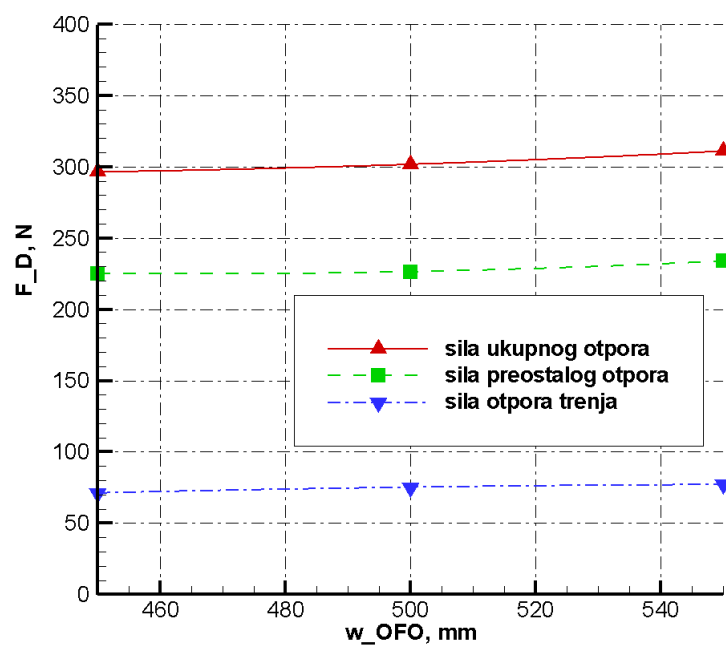
Slika 33: Promjena sile otpora s promjenom uzdužnog oblika dna



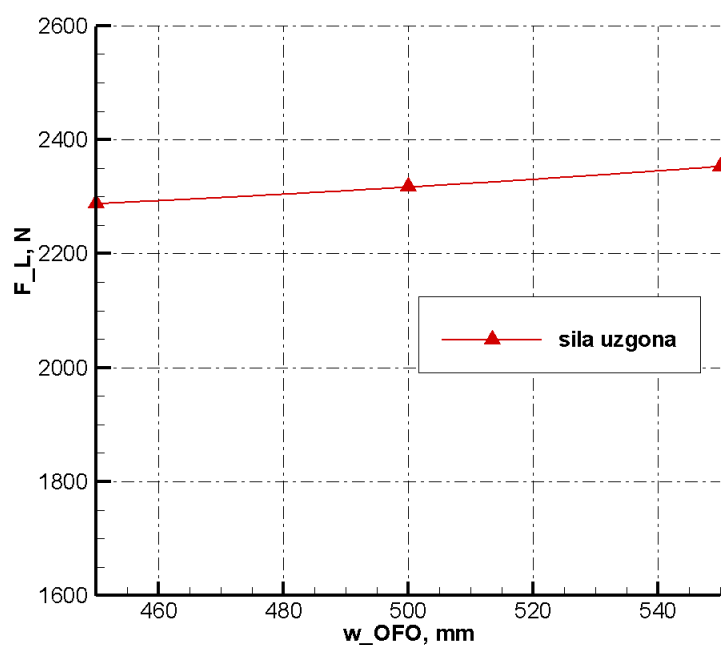
Slika 34: Promjena sile uzgona s promjenom uzdužnog oblika dna

5.3 Daske s promijenjenom širinom na krmu

Dijagrami promjene sile otpora i sile uzgona prikazani su na slikama 35. i 36. Kod modela s promijenjenom širinom na krmu može se primijetiti da povećanjem širine rastu sile otpora i uzgona. Do povećanja dolazi podjednako zbog povećanja otpora trenja, i zbog povećanja preostalog otpora. Povećanje otpora nije zanemarivo i razlika između sile otpora za model s najužom i za model s najširom krmom iznosi 4.95%. Razlika sile uzgona je manja, i iznosi 2.76%.



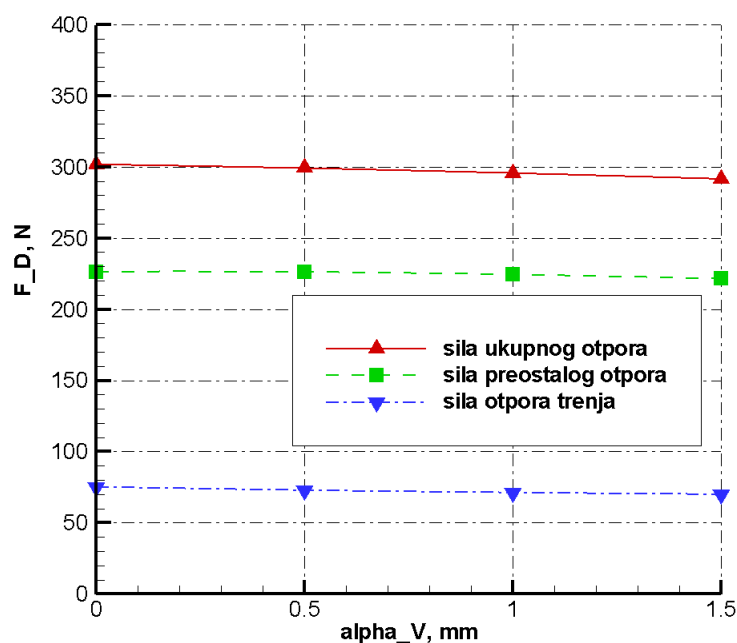
Slika 35: Promjena sile otpora s promjenom širine na krmi



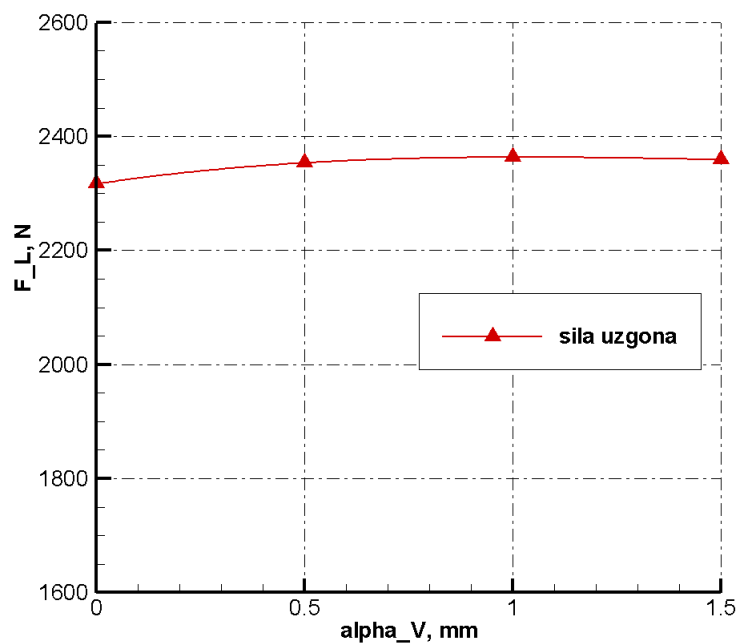
Slika 36: Promjena sile uzgona s promjenom širine na krmi

5.4 Daske s poprečnim oblikom dna u obliku ravnog V-a

Dijagrami promjene sile otpora i sile uzgona prikazani su na slikama 37. i 38. Kod modela s poprečnim oblikom dna u obliku ravnog V-a, može se primijetiti da povećanjem kuta α_V dolazi do smanjenja sile otpora. Do smanjenja dolazi ponajviše zbog smanjenja preostalog otpora. Smanjenje otpora nije zanemarivo, te za model s najvećim kutem $\alpha_V = 1.5^\circ$, ukupni otpor je manji za 3.37%, u odnosu na model s ravnim dnom. Promijenom oblika dna u obliku ravnog V-a sila uzgona ostaje približno konstantna, ali je nešto veća nego za daske s ravnim poprečnim oblikom dna.



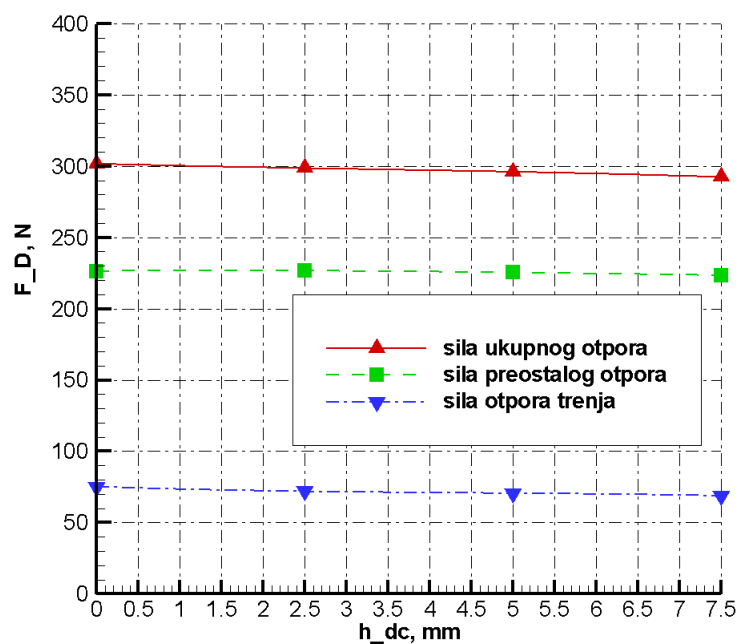
Slika 37: Promjena sile otpora kod modela s poprečnim oblikom dna oblika ravnog V-a



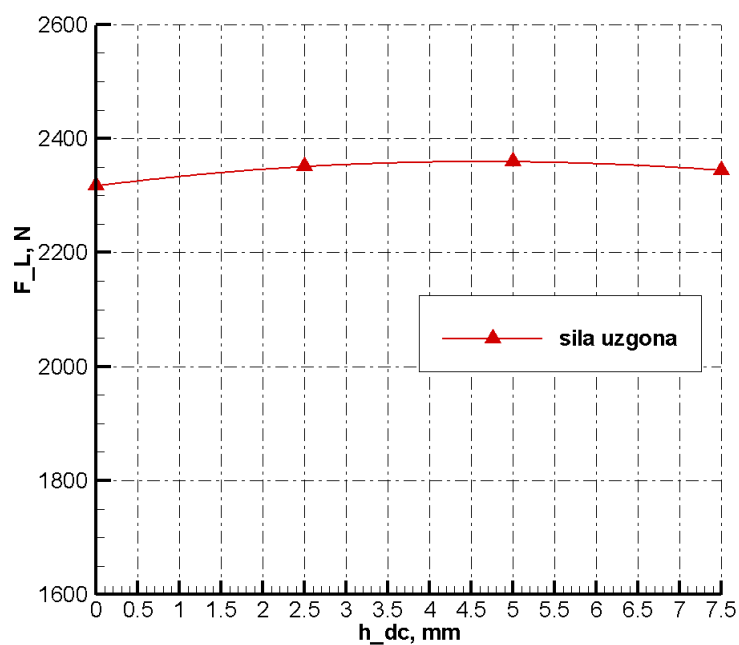
Slika 38: Promjena sile uzgona kod modela s poprečnim oblikom dna oblika ravnog V

5.5 Daske s poprečnim oblikom dna u obliku dvostruke konkave

Dijagrami promjene sile otpora i sile uzgona prikazani su na slikama 39. i 40. Kod modela s poprečnim oblikom dna u obliku dvostruke konkave povećanjem dubine konkava h_{dc} dolazi do smanjenja sile otpora. Do smanjenja sile otpora dolazi podjednako zbog smanjenja otpora trenja, i smanjenja preostalog otpora. Smanjenje otpora nije zanemarivo i za model s najvećom dubinom konkava $h_{dc} = 7.5$ mm, iznosi 3.09% u odnosu na model s ravnim dnom. Promjenom dubine konkava sila uzgona ostaje približno konstantna, ali je nešto veća, nego kod dasaka sa ravnim poprečnim oblikom dna.



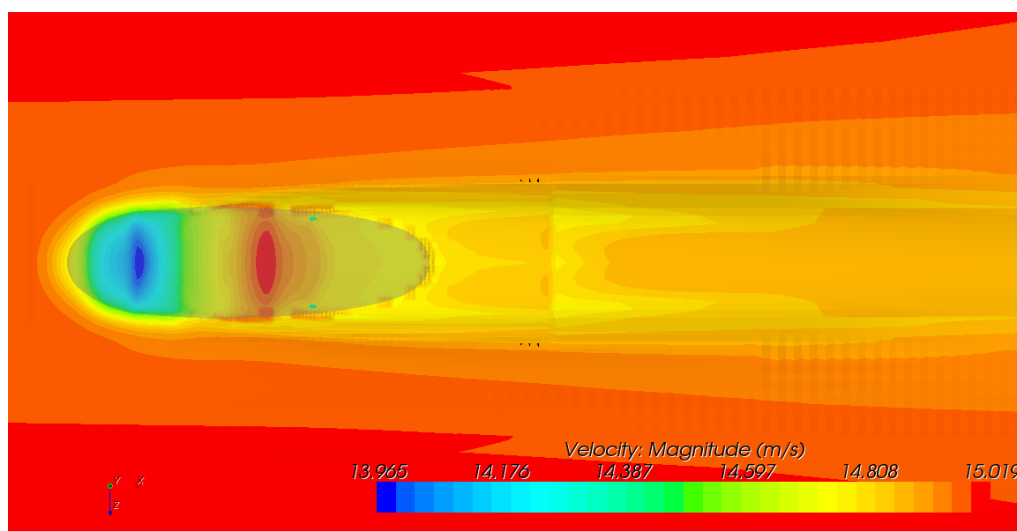
Slika 39: Promjena sile otpora kod modela s poprečnim oblikom dna oblika dvostruke konkave



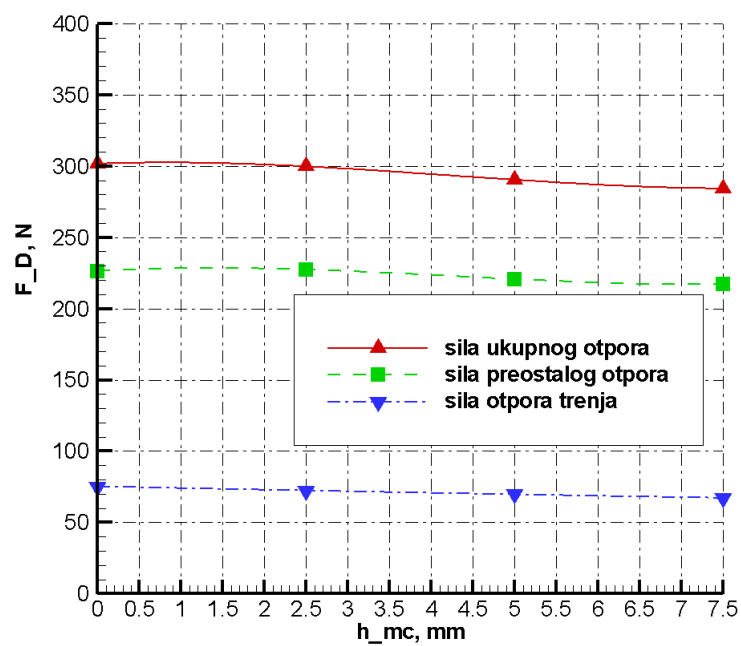
Slika 40: Promjena sile uzgona kod modela s poprečnim oblikom dna oblika dvostruke konkave

5.6 Daske s poprečnim oblikom dna u obliku monokonkave

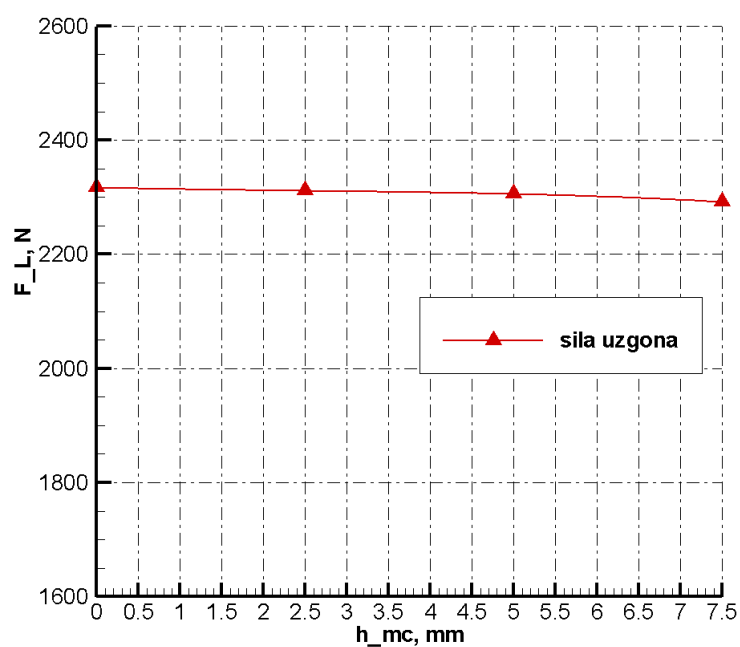
Dijagrami promjene sile otpora i sile uzgona prikazani su na slikama 42. i 43. Kod modela s poprečnim oblikom dna u obliku monokonkave povećanjem dubine konkave h_{mc} dolazi do smanjenja sile otpora. Do smanjenja sile otpora u ponajviše dolazi zbog smanjenja preostalog otpora. Smanjenje sile otpora je značajno, te za model s najvećom dubinom konkave $h_{mc} = 0.75$ mm, iznosi 5.76%, u odnosu na model s ravnim dnom. Promjenom dubine konkave sila uzgona ostaje približno konstantna, ali je nešto manja nego kod dasaka sa ravnim poprečnim oblikom dna. Uvođenjem monokonkave dolazi do dodatnih poremećaja slika polja fizikalnih veličina, što se najbolje može vidjeti na slici polja brzine na slobodnoj površini (Slika 41.).



Slika 41: Polje brzine na slobodnoj površini - pogled odozgo ($h_{mc} = 7.5$ mm)



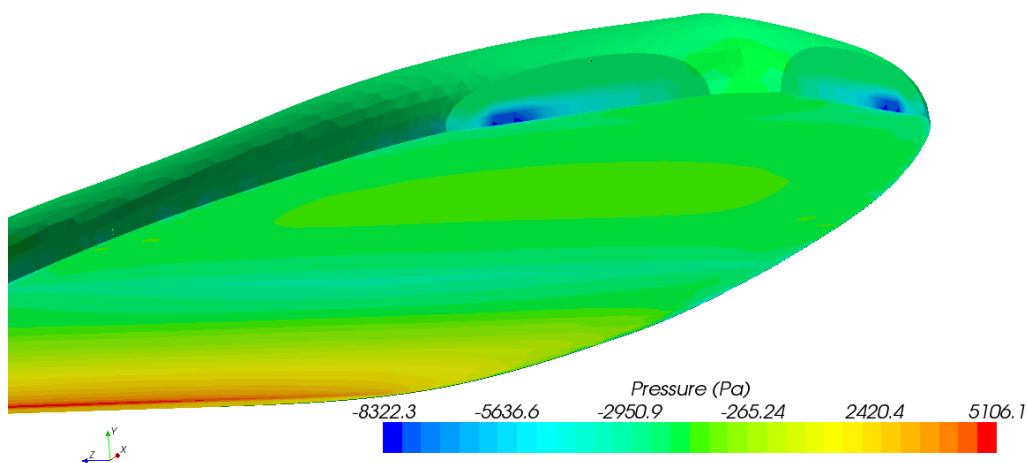
Slika 42: Promjena sile otpora kod modela s poprečnim oblikom dna oblika monokonkave



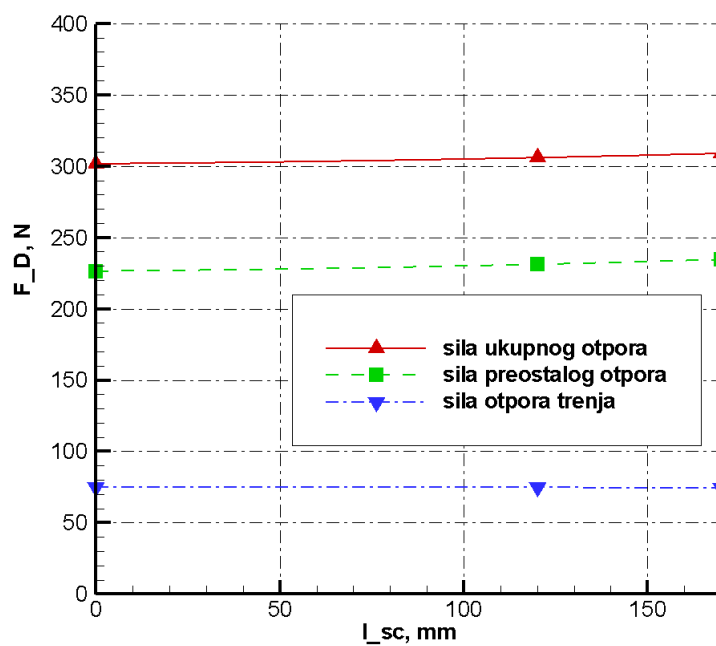
Slika 43: Promjena sile uzgona kod modela s poprečnim oblikom dna oblika monokonkave

5.7 Daske s bočnim isječcima

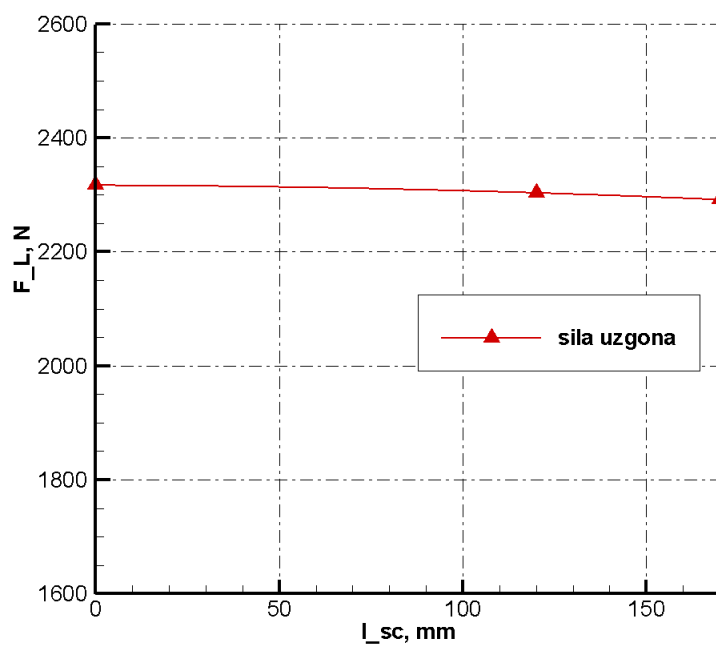
Dijagrami promjene sile otpora i sile uzgona prikazani su na slikama 45. i 46. Kod modela s bočnim isječcima, povećanjem parametara veličine isječka l_{sc} i w_{sc} dolazi do povećanja sile otpora. Do povećanja sile otpora dolazi prvenstveno zbog povećanja preostalog otpora, dok otpor trenja vrlo malo pada. Povećanje preostalog otpora može se dovesti u vezu s padom tlaka na površinama bočnih isječaka, koji je prikazan na slici 44. Povećanje sile otpora nije zanemarivo, te za isječak s većim vrijednostima l_{sc} i w_{sc} iznosi 2.41%, u odnosu na model bez isječaka. Povećanjem bočnih isječaka smanjuje se sila uzgona, ali u vrlo maloj mjeri.



Slika 44: Polje tlaka na površinama bočnih isječaka ($l_{sc} = 170$ mm, $w_{sc} = 30$ mm)



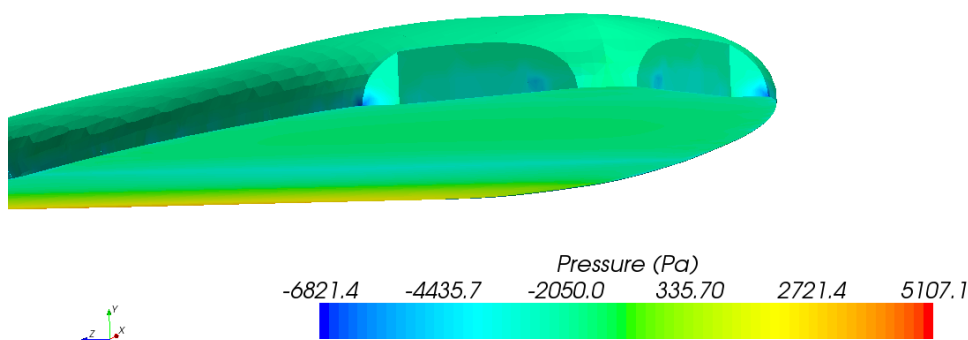
Slika 45: Promjena sile otpora kod modela s bočnim isječcima



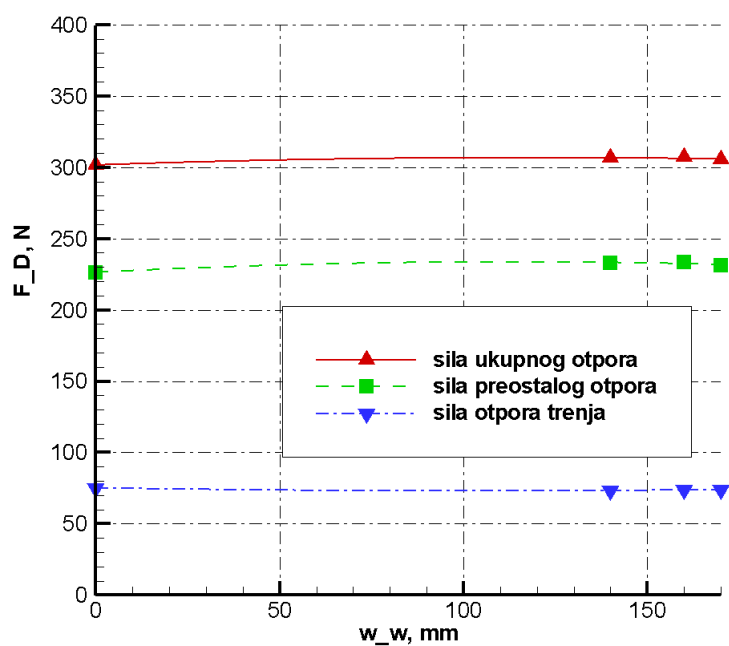
Slika 46: Promjena sile uzgona kod modela s bočnim isječcima

5.8 Daske s bočnim isječcima i bočnim suženjima

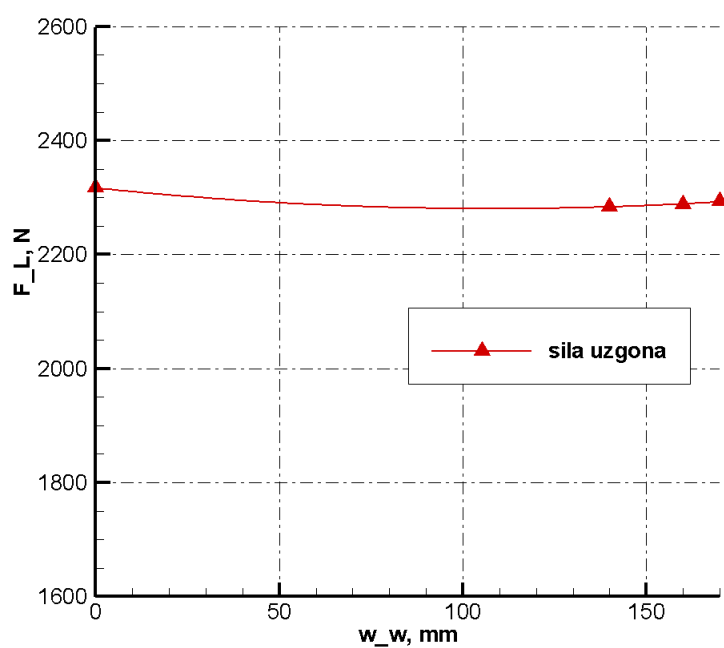
Dijagrami promjene sile otpora i sile uzgona prikazani su na slikama 48. i 49. Uvođenjem bočnih suženja i bočnih isječaka dolazi do povećanja sile otpora u odnosu na model s baznom geometrijom. Međutim, daljnjim povećavanjem bočnih suženja sila otpora se zanemarivo mijenja. Razlog povećanja sile otpora je povećanje preostalog otpora. Povećanje preostalog otpora možemo dovesti u vezu s padom tlaka na površinama bočnih isječaka i bočnih suženja, koji je prikazan na slici 47. Povećanje sile otpora za najveće bočno suženje veličine $w_w = 140$ mm, iznosi 1.56%, u odnosu na model s baznom geometrijom. S povećanjem bočnih suženja pada sila uzgona, te je kod modela s najvećim bočnim suženjem za 1.41% manja, nego kod modela s baznom geometrijom.



Slika 47: Polje tlaka na površinama bočnih isječaka i bočnog suženja ($w_w = 140$ mm)



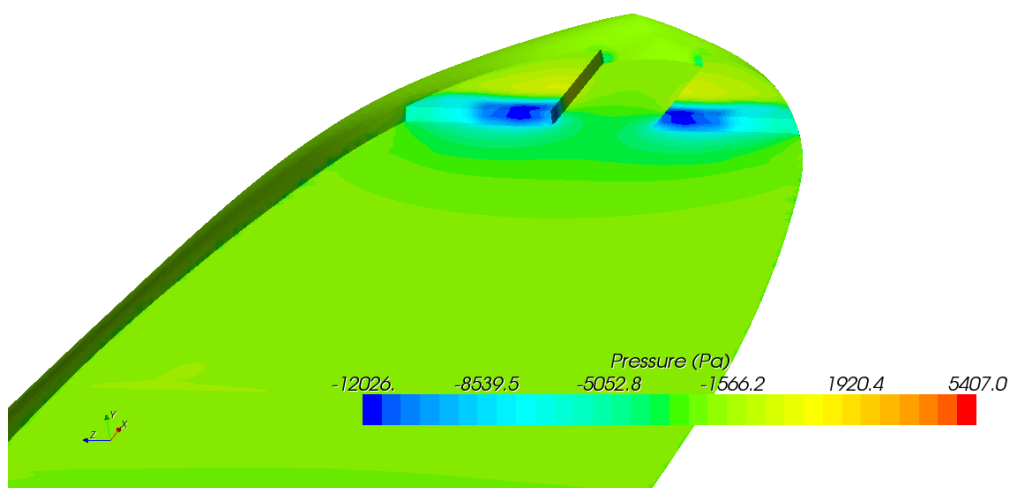
Slika 48: Promjena sile otpora kod modela s bočnim isječcima i bočnim suženjima



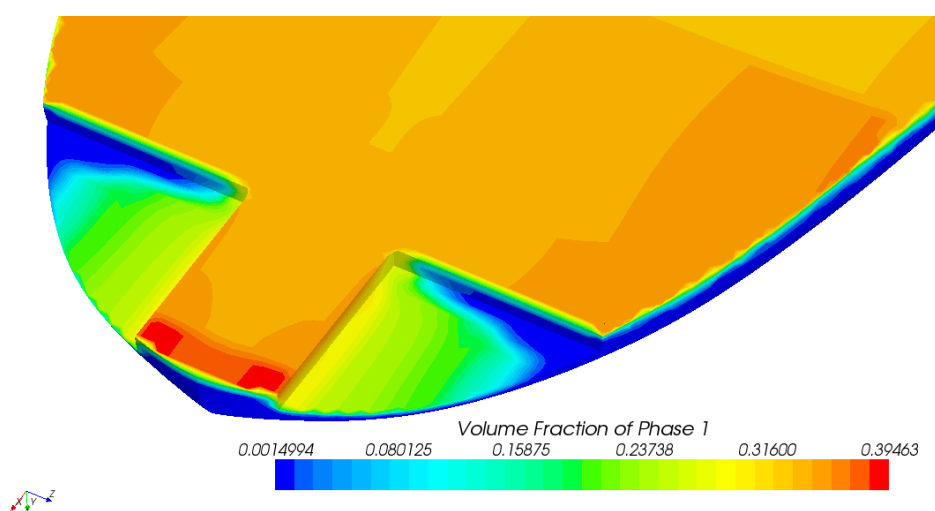
Slika 49: Promjena sile uzgona kod modela s bočnim isječcima i bočnim suženjima

5.9 Daske s isječcima

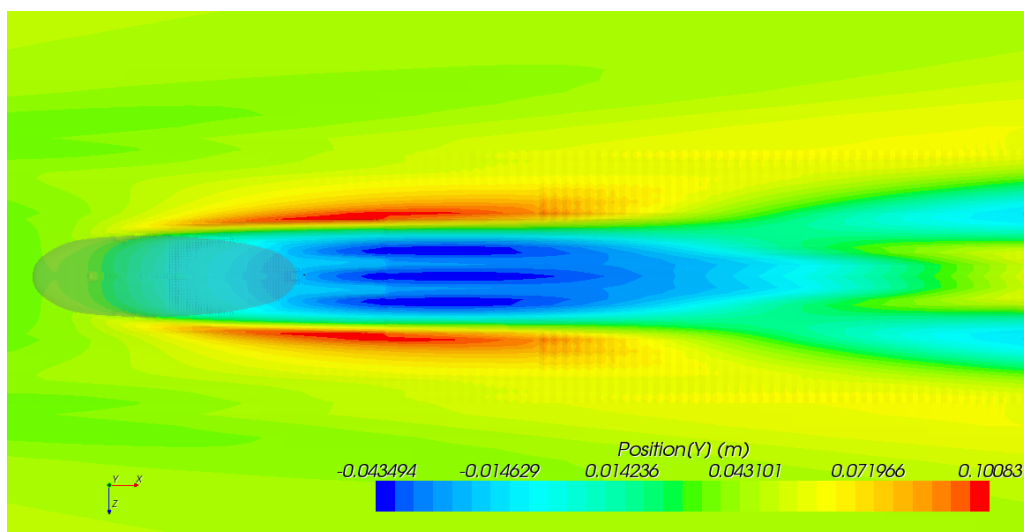
Kod modela s isječcima ispitivane su dvije vrste promjena. Ispitivan je utjecaj veličine isječka, i utjecaj dubine isječka. Dijagrami promjene sile otpora i sile uzgona s obzirom na veličinu isječka prikazani su na slikama 54. i 55., a dijagrami promjene sile otpora i sile uzgona s obzirom na dubinu isječka na slikama 56. i 57. Povećanjem veličine isječka (za konstantnu dubinu isječka $h_{ct} = 15$ mm), tj. povećanjem parametara l_{ct} i w_{ct} , dolazi do značajnog povećanja otpora. Do povećanja ukupne sile otpora dolazi zbog povećanja preostalog otpora, koje je rezultat pada tlaka na površinama isječaka (slika 50.). Na površinama isječaka dolazi do odvajanja strujanja vode, te djelomičnog punjenja isječaka zrakom (slika 51.). Dio ispunjen zrakom je malen, te vrlo brzo površine isječka dolaze u ponovni kontakt s vodom, tako da je smanjenje sile otpora trenja zbog smanjenja smočene površine zanemarivo, u odnosu na povećanje preostalog otpora. Povećanje sile otpora za model s većim isječkom iznosi 16.43%, u odnosu na model bez isječaka. Povećanjem dubine isječka (uz konstantnu veličinu isječka, $l_{ct} = 200$ mm, $w_{ct} = 30$ mm), također, dolazi do povećanja sile otpora, i to je povećanje veće nego kod povećanja veličine isječka. Povećavanjem veličine i dubine isječka, sila uzgona pada u znatnoj mjeri, te je za model s najvećim i najdubljim isječcima manja za 20.27% u odnosu na model bez isječaka. Model daske s isječcima unosi jaki dodatni poremećaj na slobodnu površinu, i u znatnoj mjeri mijenja slike polja fizikalnih veličina (slike 52. i 53.).



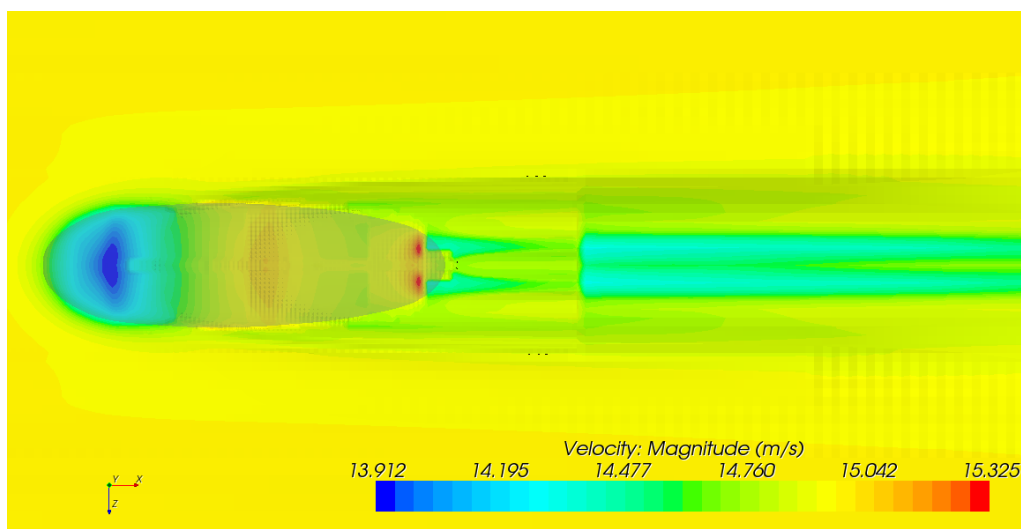
Slika 50: Polje tlaka na površinama isječaka ($l_{ct} = 200$ mm, $w_{ct} = 30$ mm, $h_{ct} = 15$ mm)



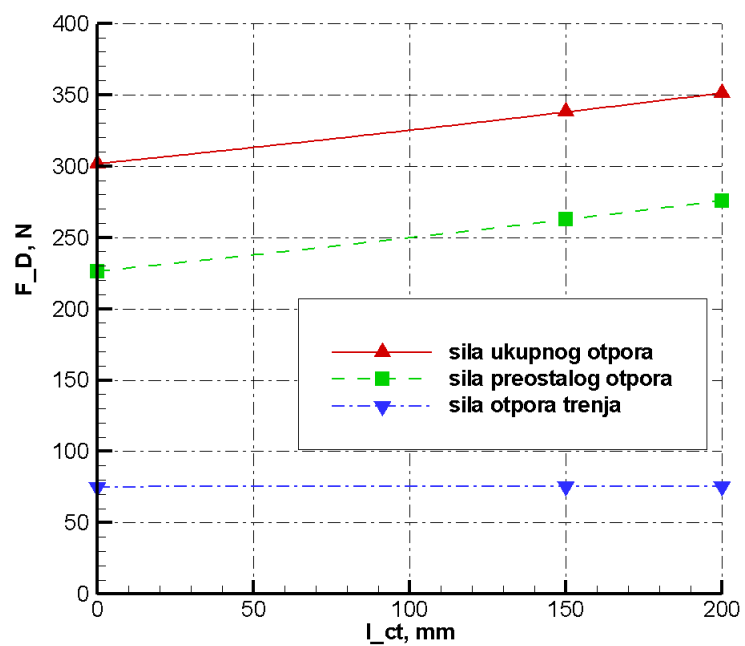
Slika 51: Volumni udjel vode na površinama isječaka ($l_{ct} = 200$ mm, $w_{ct} = 30$ mm, $h_{ct} = 15$ mm)



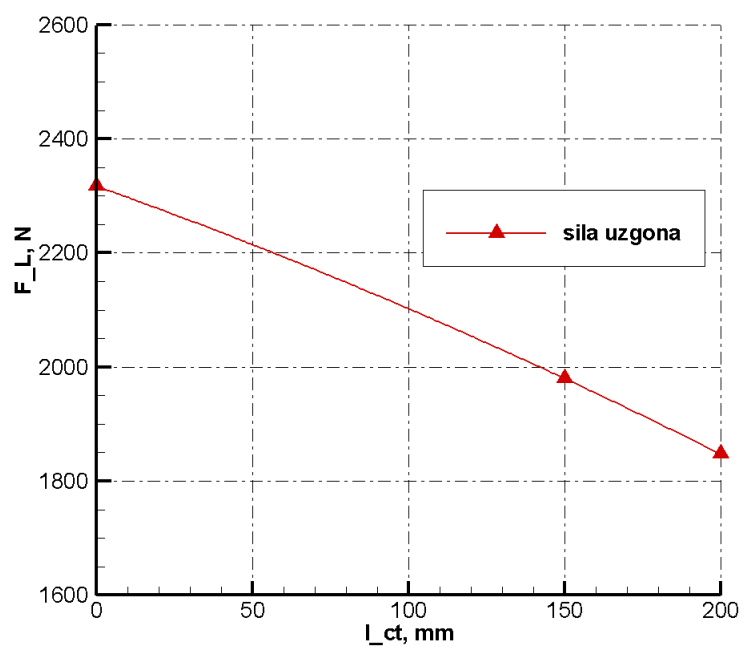
Slika 52: Slobodna površina oko krme modela s isječcima - pogled odozgo ($l_{ct} = 200$ mm, $w_{ct} = 30$ mm, $h_{ct} = 15$ mm)



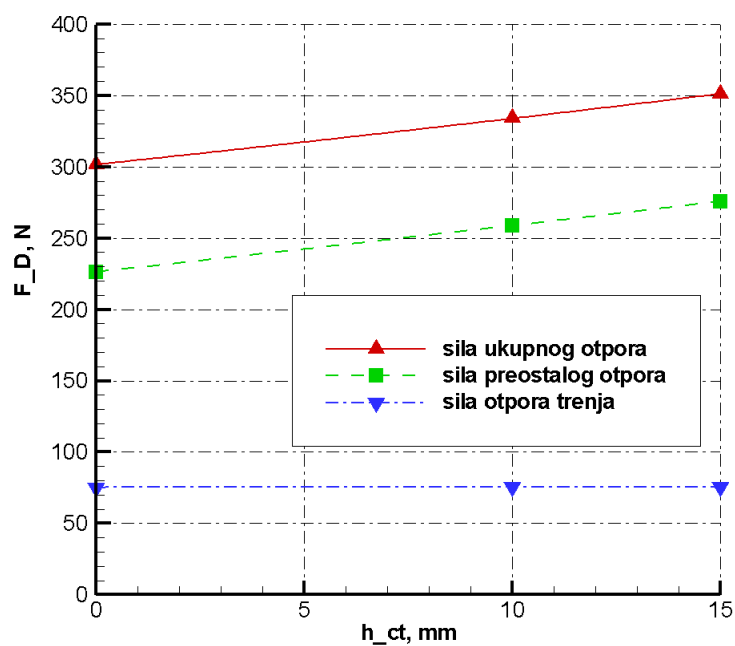
Slika 53: Polje na slobodnoj ovršini oko krme modela s isječcima - pogled odozgo ($l_{ct} = 200$ mm, $w_{ct} = 30$ mm, $h_{ct} = 15$ mm)



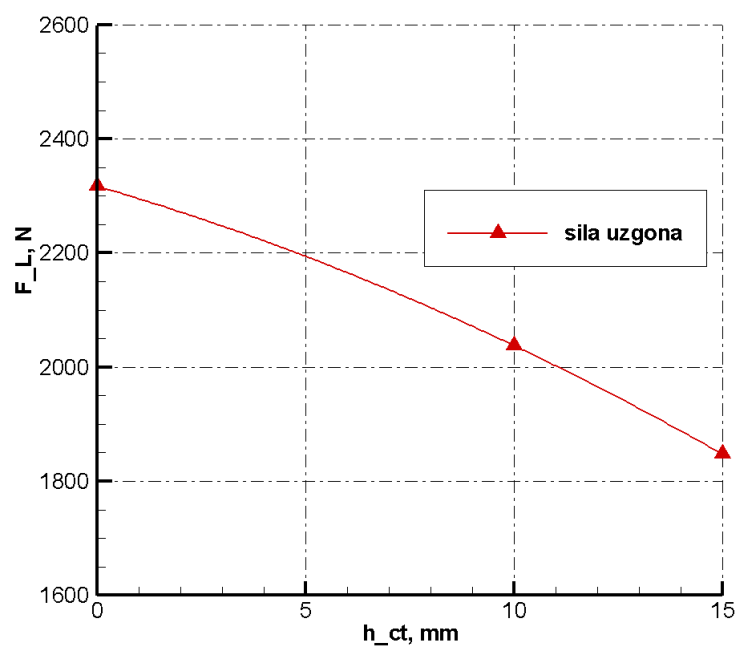
Slika 54: Promjena sile otpora s obzirom na veličinu isječka



Slika 55: Promjena sile uzgona s obzirom na dubinu isječka



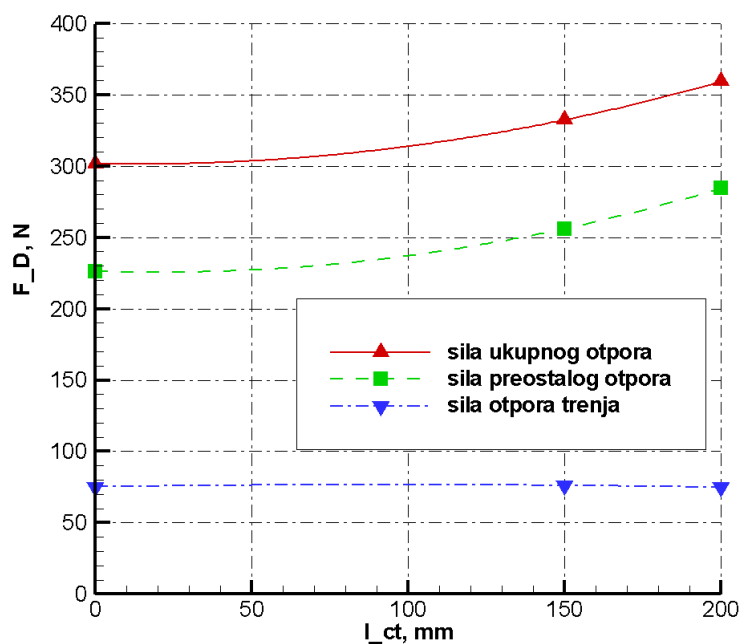
Slika 56: Promjena sile otpora s obzirom na dubinu isječka



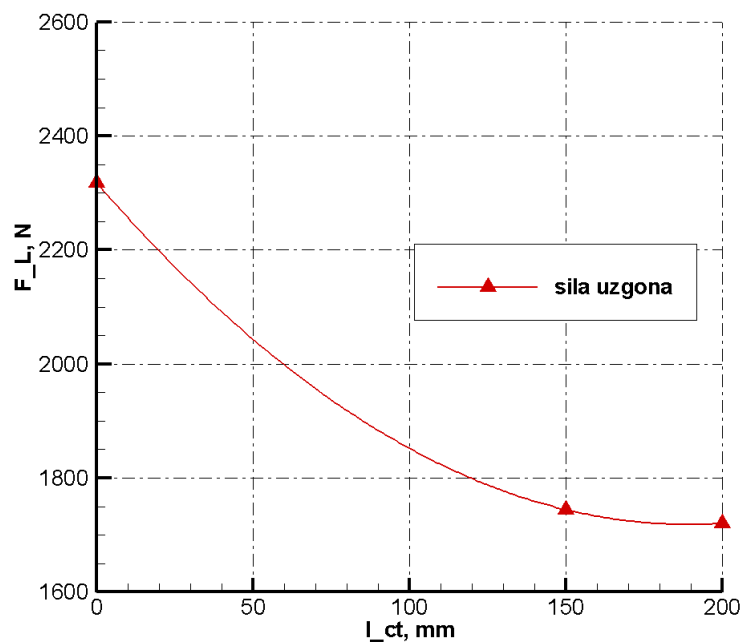
Slika 57: Promjena sile uzgona s obzirom na dubinu isječka

5.10 Daske s bočnim isječcima, isječcima i bočnim suženjima

Dijagrami promjene sile otpora i sile uzgona prikazani su na slikama 58. i 59. Kod modela s bočnim isječcima, isječcima i bočnim suženjima povećanjem promatranih parametra dolazi do povećanja sile otpora. Povećanje sile otpora ponajviše je rezultat povećanja preostalog otpora. Povećanje sile otpora je značajno, te za model s parametrima $l_{ct} = 200$ mm, $h_{ct} = 15$ mm, $w_{ct} = 30$ mm, $l_{sc} = 170$ mm, $w_{sc} = 30$ mm i $w_w = 160$ mm, iznosi 19.11% u odnosu na bazni model. Povećanjem promatranih parametar dolazi do značajnog smanjenja sile uzgona, i smanjenje za prije navedeni model iznosi 25.75%, u odnosu na bazni model. Oblik slobodne površine i slike polja fizikalnih veličina slični su onima kod modela s isječcima, i neće biti posebno prikazivani.



Slika 58: Promjena sile otpora za modele s bočnim isječcima, isječcima i bočnim suženjima



Slika 59: Promjena sile uzgona za modele s bočnim isječcima, isječcima i bočnim suženjima

5.11 Pregled rezultata za sve ispitivane modele

U tablici 1. na sljedećoj stranici, dan je pregled ukupne sile otpora (F_D), preostalog otpora (F_{DP}), otpora trenja (F_{DV}) i sile uzgona (F_L) za sve ispitivane modele.

Tablica 1. Vrijednosti sila za sve ispitivane oblike daske za jedrenje

Model	Sila otpora, F_D , N	Preostali otpor, F_{DP} , N	Otpor trenja, F_{DV} , N	Sila uzgona, F_L , N
Bazna geometrija, $h_{max}=90\text{mm}$, $w_{OFO}=500\text{mm}$	301.65	226.36	75.24	2316.77
Uzdužna linija dna, $h_{max}=110\text{mm}$	332.86	262.01	70.85	2411.63
Uzdužna linija dna, $h_{max}=130\text{mm}$	379.28	309.67	69.61	2497.62
Širina na krmu, $w_{OFO}=450\text{mm}$	296.29	225.08	71.21	2287.73
Širina na krmu, $w_{OFO}=550\text{mm}$	310.94	233.84	77.10	2352.99
Ravni V, $\alpha_V=0.5^\circ$	299.02	226.14	72.88	2353.61
Ravni V, $\alpha_V=1^\circ$	295.56	224.33	71.23	2363.56
Ravni V, $\alpha_V=1.5^\circ$	291.47	221.44	70.03	2358.98
Dvostruka konkava, $h_{dc}=0.25\text{mm}$	298.55	226.62	71.93	2350.66
Dvostruka konkava, $h_{dc}=0.5\text{mm}$	295.99	225.38	70.61	2359.21
Dvostruka konkava, $h_{dc}=0.75\text{mm}$	292.27	223.47	68.80	2344.19
Monokonkava, $h_{mc}=0.25\text{mm}$	299.71	227.35	72.36	2311.13
Monokonkava, $h_{mc}=0.5\text{mm}$	290.57	220.69	69.68	2299.52
Monokonkava, $h_{mc}=0.75\text{mm}$	284.28	217.04	67.24	2305.44
Bočni isječki, $l_{sc}=170\text{mm}$	308.91	234.52	74.39	2291.45
Bočni isječki, $l_{sc}=120\text{mm}$	305.92	231.14	74.78	2303.39
Bočna suženja, $w_w=170\text{mm}$	305.32	231.31	74.01	2293.29
Bočna suženja, $w_w=160\text{mm}$	307.06	233.29	73.77	2287.69
Bočna suženja, $w_w=140\text{mm}$	306.35	232.98	73.37	2284.18
Isječci, $l_{ct}=200\text{mm}$, $h_{ct}=15\text{mm}$	351.21	275.81	75.39	1847.19
Isječci, $l_{ct}=150\text{mm}$, $h_{ct}=15\text{mm}$	337.83	262.49	75.34	1979.52
Isječci, $l_{ct}=200\text{mm}$, $h_{ct}=10\text{mm}$	333.88	258.86	75.02	2037.35
Isječci, $l_{ct}=150\text{mm}$, $h_{ct}=10\text{mm}$	325.15	249.52	75.63	2067.01
Bočni isječki, bočna suženja, isječci, $l_{ct}=200\text{mm}$, $h_{ct}=15\text{mm}$, $l_{sc}=170\text{mm}$, $w_w=160\text{mm}$	359.31	284.45	74.86	1720.31
Bočni isječki, bočna suženja, isječci, $l_{ct}=150\text{mm}$, $h_{ct}=10\text{mm}$, $l_{sc}=120\text{mm}$, $w_w=170\text{mm}$	332.45	256.25	76.2	1744.29

6 Zaključak

Nakon provedenih simulacija može se zaključiti da su rezultati više nego zadovoljavajući. Izrađeni numerički model bio je dovoljan, da omogući jasan uvid u utjecaj geometrijskog oblika daske za jedrenje na njezine performanse. Čak i za relativno male promjene geometrije, numerički model je uspio detektirati sve bitne fizikalne pojave, i odrediti trendove promjene sile otpora i sile uzgona.

Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti da je najpovoljniji geometrijski oblik daske, s obzirom na silu otpora, oblik s monokonkavnim poprečnim oblikom dna, i to sve izraženije s povećanjem dubine konkave. Također, je vidljivo da svi poprečni oblici dna koji se koriste na komercijalnim daskama, imaju manji otpor od dna s potpuno ravnim poprečnim presjekom. Promjene sila, kod promjena uzdužnog oblika dna i širine daske na krmi su očekivane, i samo su potvrdile pretpostavke. Međutim, kod analize sila za različite oblike krmenog dijela, rezultati su više nego iznenađujući. Suprotno svim izjavama projektanata dasaka, bilo kakve promjene krmenog dijela dovode do povećanja otpora, a posebno valja istaknuti vrlo veliko povećanje otpora za modele s isječcima. Promjene sile uzgona nisu toliko izražajne, kao promjene sile otpora, ali se i tu ističu modeli s isječcima, koji imaju znatno manji uzgon od ostalih modela. Iz ovih rezultata moglo bi se zaključiti da je fama, koja je proteklih nekoliko godina stvorena oko dizajna krmenog dijela obični marketinški trik. Međutim, treba naglasiti da i rezultati simulacije ovise o mnogo parametara, a prije svega o odabranoj poziciji daske u odnosu na početnu slobodnu površinu (kut nagiba daske i dubina urona na krmi), tako da je moguće da bi za neke druge pozicije rezultati bili drugačiji.

Treba naglasiti, da u današnje vrijeme proizvođači dasaka za jedrenje uopće ne koriste alate računalne dinamike fluida, i da je ovo jedan od prvih koraka u tom smjeru, te svakako predstavlja izvrsnu podlogu za daljnja istraživanja. Sljedeći važan korak bi bio provođenje eksperimentalnog ispitivanja u testnom bazenu, kojim bi se rezultati numeričkog modela opovrgnuli ili potvrdili. U slučaju neslaganja rezultata, trebalo bi se pristupiti izradi boljeg numeričkog modela, a u slučaju potvrde rezultata, više ne bi postojala nikakva zapreka za uvođenje računalne dinamike fluida u projektiranje komercijalnih dasaka.

Prilog

- DVD-R disk

Literatura

- [1] STAR-CCM+ User guide
- [2] Džijan, I., Predavanja iz Računalne dinamike fluida, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [3] www.star-board.com
- [4] www.fanatic.com
- [5] carbonartwindsurf.com
- [6] www.speedsurfingblog.com